

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2011

Kristýna Friedrichková

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Měřicí systém solárního fotovoltaického panelu
Photovoltaic Solar Panel Measurement System

2011

Kristýna Friedrichková

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně.
Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.*

Datum odevzdání diplomová práce 6.5.2011.

.....

Prohlašuji, že jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 ods. 3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 6.5.2011

.....

*„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26,
odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU
Ostrava.“*

V Ostravě: 6.5.2011

.....

Poděkování

Za účinnou podporu, obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracovávání této diplomové práce tímto děkuji doc. Ing. Bohumilu Horákovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Kazárikovi.

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou fotovoltaických solárních článků a panelů a metodami jejich měření. Úkolem bylo nastudovat tuto problematiku, navrhnout a realizovat měřicí systém pro měření a diagnostiku fotovoltaických článků a panelů. V praktické části práce je podrobněji rozpracována elektrická metoda měření, pomocí níž se při definovaném osvětlení měří voltampérová charakteristika soustavy. Z diagnostických metod byl pro svou progresivitu a možné budoucí masové nasazení zvolen elektroluminiscenční test. Jedná se o test umožňující zjistit vady ve struktuře fotovoltaického článku. V závěru práce je provedeno zhodnocení návrhu a realizace měřicích systémů, provedena základní analýza realizovaných měření a je shrnuto porovnání vlastností současně využívaných technologií výroby fotovoltaických solárních článků.

V rámci diplomové práce realizovaný měřicí systém a metodika měření byly realizovány do formátu laboratorní úlohy, kdy je systém řízen pomocí PC s měřicí kartou a naprogramován pomocí programu LabView. Realizovaná laboratorní měření byla porovnávána s měřeními realizovanými ve společnosti Schott solar, Valašské Meziříčí.

Abstract

This thesis deals with photovoltaic solar cells and panels, and methods of measurement. The goal of this work was to study the issue, propose and implement a measurement system for measurement and diagnosis of photovoltaic cells and panels. The practical part is elaborated electrical measurement method by which to measure the defined lighting voltampere rating system. The diagnostic methods was for its progressiveness and possible future mass deployment of selected electroluminescent test. This is a test to detect defects in the structure of the photovoltaic cell. In conclusion, an evaluation of the design and implementation of measurement systems, performed basic analysis undertaken and is summarized by measurements comparing the performance of technologies currently used by photovoltaic solar cells.

The thesis has been implemented measurement system and methodology for measuring the size of laboratory tasks when the system is controlled by a PC measuring card, programmed with LabVIEW. The realized laboratory measurements were compared with measurements realized in the Schott Solar Meziříčí.

Klíčová slova

Fotovoltaický solární článek, výroba, měření článků, měření panelů, diagnostika, měřicí systém.

Keywords

Photovoltaic solar cell, manufacturing, cells measurement, panels measurement, diagnostics, measurement system.

Seznam použitých symbolů a zkratek

| | | |
|------------------|--|-----------------------|
| Am | Ampérmetr | |
| A/D | Analogově digitální převodník | |
| AI | Analogový vstup (Analog Input) | |
| AM | Amplitudová modulace (Amplitude Modulation) | |
| AO | Analogový výstup (Analog Output) | |
| CCD | Kamera (Charge Coupled Device) | |
| DIO | Digitální vstup/výstup | |
| E | Intenzita záření | Lux, W/m ² |
| ELCD | Elektroluminiscenční test | |
| FV | Fotovoltaický | |
| GND | Země, uzemnění | |
| h _{21E} | Zesilovací činitel | |
| CHA-KA | Charakteristika | |
| I | Proud | A |
| I/O | Vstupy/výstupy | |
| I _B | Proud do báze | A |
| I _C | Proud kolektorem | A |
| I _{IN} | Vstupní proud | A |
| I _k | Proud nakrátko | A |
| I _{OUT} | Výstupní proud | A |
| I _{vd} | Proud naměřený v 1 bodě napětí | A |
| LBI | Světlem indukovaný paprsek (Light Beam Induced) | |
| LBIC | Světelný paprsek indukovaný proudem (Light Beam Induced Current) | |
| LBIP | Světelný paprsek indukované energie (Light Beam Induced Power) | |
| LBIV | Světelný paprsek indukovaný napětím (Light Beam Induced Voltage) | |

| | | |
|---------------------|---|------|
| LPT | Skenovací zařízení | |
| LW | LabView – programové prostředí od firmy National Instruments | |
| OPC | Opel Performance Center | |
| PC | Počítač | |
| PLC | Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller) | |
| P _z | Zkratový výkon | W |
| R _E | Odpor emitoru | |
| R _i | Vnitřní odpor | Ω |
| R _M | Rankové metody | Ω |
| R _{ser} | Sériový odpor | Ω |
| R _{sh} | Paralelní odpor | Ω |
| R _{shunt} | Zkratový odpor | Ω |
| R _{TH J-A} | Přechodový odpor přechod – okolí | °C/W |
| R _{TH J-C} | Přechodový odpor přechod – obal | °C/W |
| T _{jmax} | Teplota přechodu | °C |
| U _{IN} | Vstupní napětí | V |
| U _{oc} | Napětí naprázdno | V |
| U _{OUT} | Výstupní napětí | V |
| USB | Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus) | |
| V _m | Voltmetr | |
| VA | Voltampérová charakteristika | |
| λ | Lambda | |

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 3 |
| 2 | Cíle práce | 4 |
| 3 | Slunce | 5 |
| 3.1 | Základní informace | 5 |
| 3.2 | Sluneční záření | 5 |
| 3.3 | Energetické přeměny slunečního záření | 7 |
| 3.3.1 | Nepřímé využití slunečního záření | 8 |
| 3.3.2 | Přímé využití slunečního záření | 8 |
| 4 | Fotovoltaické články | 9 |
| 4.1 | Historie | 9 |
| 4.2 | Rozdělení solárních článků dle vývoje | 9 |
| 4.3 | Základní rozdělení solárních článků | 9 |
| 4.3.1 | Rozdělení solárních článků podle struktury | 9 |
| 4.3.2 | Rozdělení solárních článků podle druhu vrstev a technologie výroby | 9 |
| 4.3.3 | Rozdělení solárních článků podle počtu přechodů | 9 |
| 4.4 | Náhradní schéma | 10 |
| 4.5 | Výkon solárních fotovoltaických článků | 10 |
| 4.6 | Zvýšení výkonu pomocí spojování fotovoltaických článků | 12 |
| 4.7 | Zvýšení výkonu pomocí vnějších prostředků | 12 |
| 5 | Měřicí metody | 13 |
| 5.1 | Systém měření elektrických vlastností FV článků a panelů | 13 |
| 5.2 | Měření VA charakteristik FV panelů | 14 |
| 5.2.1 | Měření propustného napětí při osvětlení | 14 |
| 5.2.2 | Měření závěrného napětí za tmy | 16 |
| 5.2.3 | Měření napětí na panelu za tmy s R_{ser} a R_{shunt} hodnotami | 16 |
| 5.3 | Diagnostické testovací systémy | 17 |
| 5.3.1 | Metoda měření mikroplazmatu | 17 |
| 5.3.2 | Metoda LBI | 18 |
| 5.3.3 | Fotoluminiscenční detekční metoda | 21 |
| 5.3.4 | Elektroluminiscenční metoda | 22 |
| 6 | Realizace vybraných metod | 24 |
| 6.1 | Elektrická metoda – měření VA charakteristik při osvětlení | 24 |
| 6.1.1 | Měření VA charakteristik při osvětlení | 24 |
| 6.1.2 | Technické prostředky pro měření VA charakteristik FV článků | 25 |
| a) | Měřicí modul USB 8006 | 25 |
| b) | Převodník Solar | 27 |
| 6.1.3 | Programové vybavení | 33 |
| 6.1.4 | Výsledky měření VA charakteristik FV panelů | 39 |
| 6.2 | Elektroluminiscenční test | 41 |
| 6.2.1 | Teoretický úvod | 41 |
| 6.2.2 | Technické prostředky | 43 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.2.3 | Programové vybavení..... | 44 |
| 6.2.4 | Výsledky měření a zpracování obrazové informace | 46 |
| 7 | Závěr..... | 49 |
| 8 | Použitá literatura..... | 51 |
| 9 | Seznam příloh..... | 53 |

1 Úvod

Jedním z klíčových bodů energetické politiky Evropské unie je požadavek snížení budoucí závislosti na fosilních palivech a využívání alternativních a obnovitelných zdrojů energií. V měřítku existence lidstva a jeho potřeb jde o technologie využívající přímých přeměn forem energie ze Slunce. Energie získaná přímo ze slunečního záření v době funkce energetického zdroje je z hlediska životního prostředí jedním z nejčistších způsobů její výroby.

Tématem předložené diplomové práce je problematika *měření soustav solárních fotovoltaických článků v podobě panelů*. Po krátkém úvodu a nastínění cílů práce je ve třetí kapitole uvedena všeobecná teoretická část shrnující problematiku obnovitelných a alternativních zdrojů energií se zaměřením na solární systémy.

Čtvrtá kapitola je zaměřená na fotovoltaické články, jejich historii, rozdělení podle vývoje a struktury a jejich charakteristiky.

V páté kapitole jsou popisovány elektrické a diagnostické měřicí metody.

Šestou kapitolou začíná praktická část diplomové práce. Zde je podrobně rozpracována elektrická metoda, pomocí níž se měří voltampérová charakteristika. V práci byly měřeny tři demonstrační solární panely při definovaném osvětlení. Druhá část této kapitoly přibližuje elektroluminiscenční test. Jedná se o test umožňující zjistit a vizualizovat vady ve struktuře solárních fotovoltaických článků. Jsou popisovány jednotlivé kroky měření a uvedeny výsledky realizovaných měření a testů.

V ČR je využití sluneční energie, přes některé přehmaty způsobené zájmovými skupinami, na počátku svého rozvoje. Přeměna slunečního záření na elektrickou energii se jeví, v malém měřítku v současnosti na základě státem nastavených komerčních podmínek, jako neekonomická. Optimalizovaná instalace solárních fotovoltaických a fototermických systémů spolu s technologiemi tepelných čerpadel a technologiemi snižování spotřeby energií domácnostmi (spotřebiče AA, nízkopříkonová osvětlení, rozvoj e-mobility apod.), mohou vést v budoucnosti k realizaci rodinných domů plně nezávislých na dodávkách tepla a elektrické energie z veřejných sítí. Vzhledem k tomu, že ceny energií neustále rostou a nejineak tomu bude i v budoucnu, čas alternativních zdrojů energie, tedy i solárních systémů teprve přijde.

2 Cíle práce

Cílem práce je seznámit se s problematikou alternativních a obnovitelných zdrojů energií se zaměřením na energetické přeměny slunečního záření. Nastudovat problematiku fotovoltaických solárních článků od jejich vzniku až po současný stav. Sledovat vývoj v oblasti složení článků, rozdělení článků dle vývoje a struktury, jejich vlastností. Zjistit zda a jak je možné zvyšovat výkon fotovoltaických instalací. Seznámit se s aplikačními specifiky, s technologickým a provozním měřením článků a soustav článků v panelech.

Dalším cílem je návrh a realizace měřicího systému pro diagnostiku fotovoltaických článků a panelů, automatizace tohoto měřicího systému a realizace a popis souvisejících měření.

K dalším cílům pak patří zhodnocení návrhu a realizace, analýza realizovaných měření a rovněž porovnání vlastností jednotlivých technologií fotovoltaických solárních článků.

3 Slunce

3.1 Základní informace

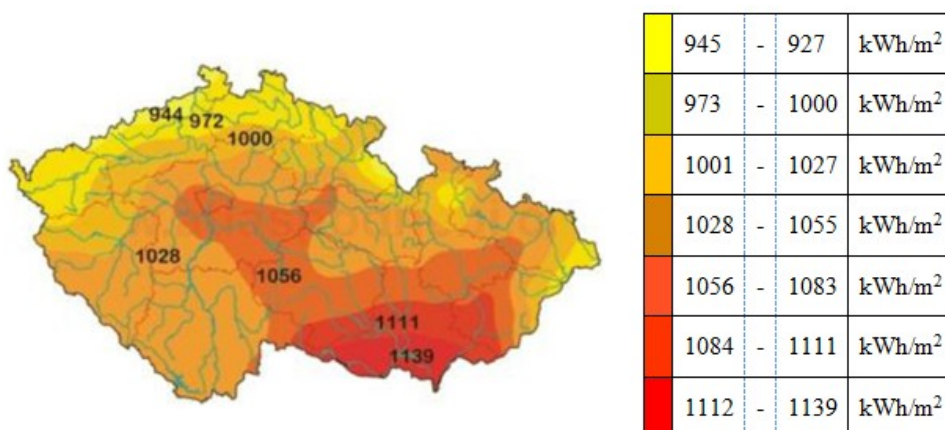
Slunce tvoří centrum Sluneční soustavy. Od Země je vzdálené 150 milionů km. Je to koule žhavé plazmy neustále produkující ohromné množství energie. Jeho výkon je zhruba $4 \cdot 10^{26}$ W, z čehož na Zemi dopadá přibližně $1,7 \cdot 10^{17}$ W.

Tok energie ze Slunce na Zemi činí asi $1,4 \cdot 10^3$ W m⁻². Teplota na povrchu Slunce činí asi 5800 K.

Průměr Slunce je zhruba 1 400 000 km, což činí asi 109 průměrů Země. Jeho objem je tedy asi 1,3 milionkrát větší než objem Země. Hustota Slunce je průměrně 1400 kg m⁻³. Slunce se otáčí jinou rychlostí u pólů a na rovníku. Na rovníku se otočí jednou za 25 dní, na pólech jednou za 36 dní.

Energie ve Slunci vzniká termojadernou fúzí, tzv. p-p řetězcem. Zemská atmosféra propouští jen část spektra slunečního záření - všechny složky viditelného spektra, část ultrafialového, infračerveného a radiového záření.

Vzhledem k tomu, že Země je „kulatá“ nedopadá energie ze Slunce na Zemi stejnoměrně (viz.obr.1). Sluneční energie plynule klesá od rovníku k pólu, a to až o 40%.



Obr.1: Sluneční poměry v ČR

[8]

| | |
|---|----------------------------|
| Podíl difúzního záření | 50% a více |
| Průměrná délka slunečního svitu v roce | 2000hod |
| Souhrn dopadu energie letní období | 3/4 |
| Souhrn dopadu energie zimní období | 1/6 |
| Střední hodnota úhrnu globálního záření | 1100-1250kW/m ² |

Tab.1: Osvitové poměry v ČR

3.2 Sluneční záření

Denní světlo dopadá na Zemi jednak jako přímé sluneční záření a jednak jako difúzní záření (oblohové světlo) rozptýlené atmosférou (molekulami vzduchu, částicemi aerosolů, oblaků a jinými částicemi).

Přímé sluneční záření přichází do oka pozorovatele ze Slunce a vzhledem k velké vzdálenosti Země od Slunce tvoří svazek prakticky rovnoběžných paprsků. Rozptýlené sluneční záření vzniká

následkem rozptylu přímých slunečních paprsků na molekulách plynných složek vzduchu, na vodních kapičkách, ledových krystalcích a na nejrůznějších aerosolových částicích vyskytujících se v zemském ovzduší. Rozptýlené viditelné sluneční záření pozorujeme jako světlo oblohy, a kdyby jej nebylo, jevila by se nebeská klenba i během dne černá s ostře zářícím slunečním diskem a s hvězdami.









Sluneční záření je elektromagnetické vlnění o spektru vlnových délek (viz. tab.2), které před vstupem do zemské atmosféry připomíná spektrum absolutně černého tělesa o povrchové teplotě cca 6000 K. Sluneční spektrum se obvykle dělí na tři hlavní části a podle toho rozlišujeme:

1. ultrafialové sluneční záření s vlnovými délkami menšími než 390 nm, které před vstupem do zemské atmosféry tvoří asi 7 % energie celkového elektromagnetického slunečního záření a jež je ze značné části absorbováno atmosférickým ozónem ve stratosféře,

2. viditelné sluneční záření s vlnovými délkami od 390nm do 760nm vytvářející spektrum barev od fialové po červenou (asi 48 % energie celkového elektromagnetického slunečního záření před vstupem do atmosféry),

3. infračervené sluneční záření, které má vlnové délky větší než 760nm a před vstupem do atmosféry tvoří přibližně 45 % z toku energie slunečního záření.

Základní veličinou při popisu přímého slunečního záření je jeho intenzita I , kterou definujeme jako množství zářivé energie, jež za jednotku času dopadá na jednotkovou plochu orientovanou kolmo ke slunečním paprskům.

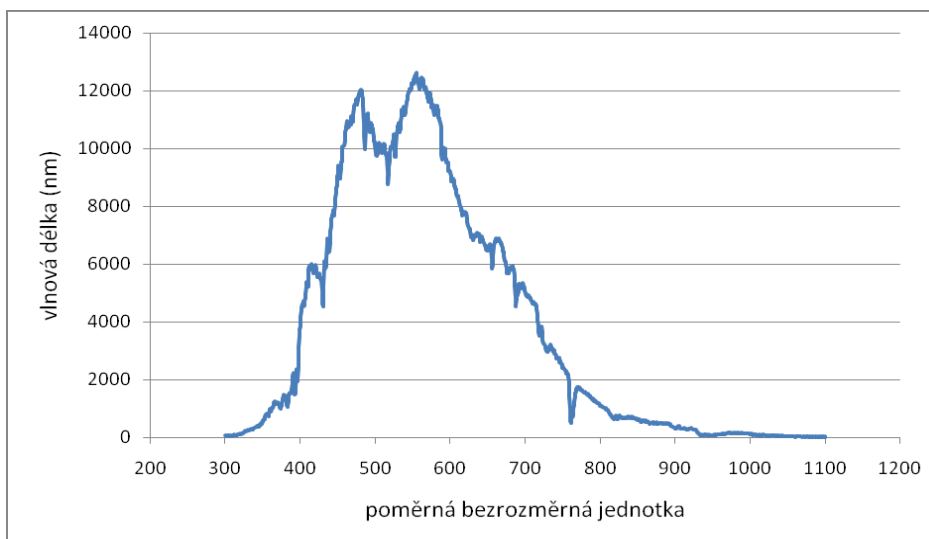
| Barva | Rozsah vlnových délek (nm) | Střed (nm) |
|---|----------------------------|------------|
|  | 390-430 | 400 |
|  | 430-485 | 450 |
|  | 485-505 | 495 |
|  | 505-550 | 525 |
|  | 550-575 | 555 |
|  | 575-585 | 580 |
|  | 585-620 | 600 |
|  | 620-760 | 650 |

Tab. 2: Přehled vlnových délek viditelného záření.

[3]



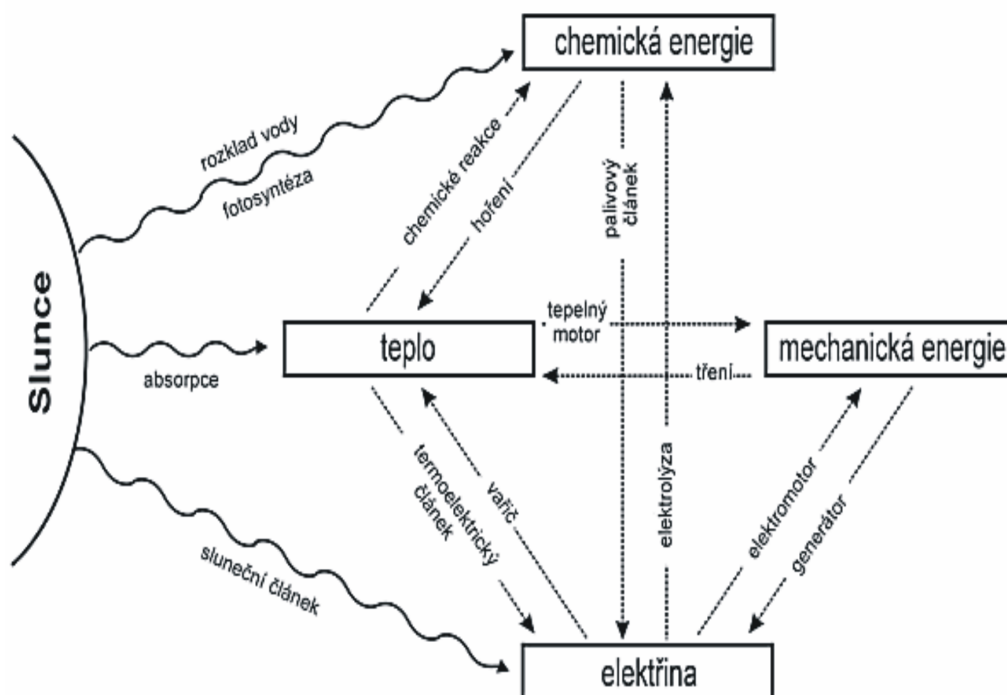
Obr.2: Foto oblohy slunečného dne v době snímání spektra viz. obr.3



Obr.3: Spektrum dopadajícího slunečního záření při jasném slunečném dni

3.3 Energetické přeměny slunečního záření

Energie může mít různé podoby (viz. obr.4): pohybovou, tepelnou, elektrickou aj. Jedním ze základních přírodních zákonů je zákon zachování energie.



Obr.4: Blokové schéma rozdělení energetických přeměn energie ze Slunce

[1]

3.3.1 Nepřímé využití slunečního záření

- Energie vody

Sluneční energie → pohybová energie vody → pohybová energie turbíny → pohybová energie generátoru → elektrická energie.

- Energie větru

Sluneční energie → pohybová energie větru → pohybová energie vrtule → pohybová energie generátoru → elektrická energie.

- Energie biomasy

Sluneční energie → chemická energie (fotosyntéza v rostlinách) → chemická energie (biopaliva) → teplo (spalování biopaliv).

3.3.2 Přímé využití slunečního záření

- Přeměna na teplo

Sluneční energie → teplo (fototermické kolektory).

- Přeměna na elektřinu

Sluneční energie → elektrická energie (fotovoltaické panely).

[9]

4 Fotovoltaické články

4.1 Historie

Historie fotovoltaického článku se začala odvíjet v roce 1839. V tomto roce prováděl francouzský fyzik Antoine C. Becquerel pokusy s dvěma kovovými elektrodami umístěnými v elektrovedivém roztoku. Při jejich osvětlení světlem docházelo ke změně napětí na kovových elektrodách. V roce 1877 objevili William G. Adams a Richard E. Day fotovoltaický efekt na selenu a byl vyroben první solární článek. V roce 1918 objevil způsob růstu monokrystalu křemíku polský vědec Jan Czochralsky. Jako vynálezce křemíkového solárního článku je označován američan Russell S. Ohl. Patent za vynález fotovoltaického článku ale obdrželi 5.března 1954 Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin a Calvin S. Fuller, kteří v dubnu 1954 vyrobili solární fotovoltaické články o účinnosti 4,5%. Následný vývoj zrychlilo rozhodnutí používat je jako zdroj energie pro umělé družice Země a následně rozvoj hromadné výroby polovodičů a snahy o získávání elektrické energie z alternativních a obnovitelných zdrojů energií a omezování užívání fosilních paliv.

[10]

4.2 Rozdělení solárních článků dle vývoje

- První generace - do této generace jsou řazeny články, jejichž základem jsou křemíkové pláty.
- Druhá generace - se snaží o snížení nákladů na výrobu a křemíkové pláty jsou nahrazeny podložkou ze skla, plastu nebo textílie.
- Třetí generace – zde se řadí systémy, které používají k separaci nábojů jiné metody než p-n přechod a často i jiné materiály než polovodiče.
- Čtvrtá generace - solární články tvoří kompozitní, z jednotlivých vrstev složené fotovoltaické články, schopné efektivně využívat širokou část spektra slunečního záření.

[35]

4.3 Základní rozdělení solárních článků

4.3.1 Rozdělení solárních článků podle struktury

- Organické
- Anorganické
 - Monokrystalické články
 - Polykrystalické články
 - Amorfnní články

4.3.2 Rozdělení solárních článků podle druhu vrstev a technologie výroby

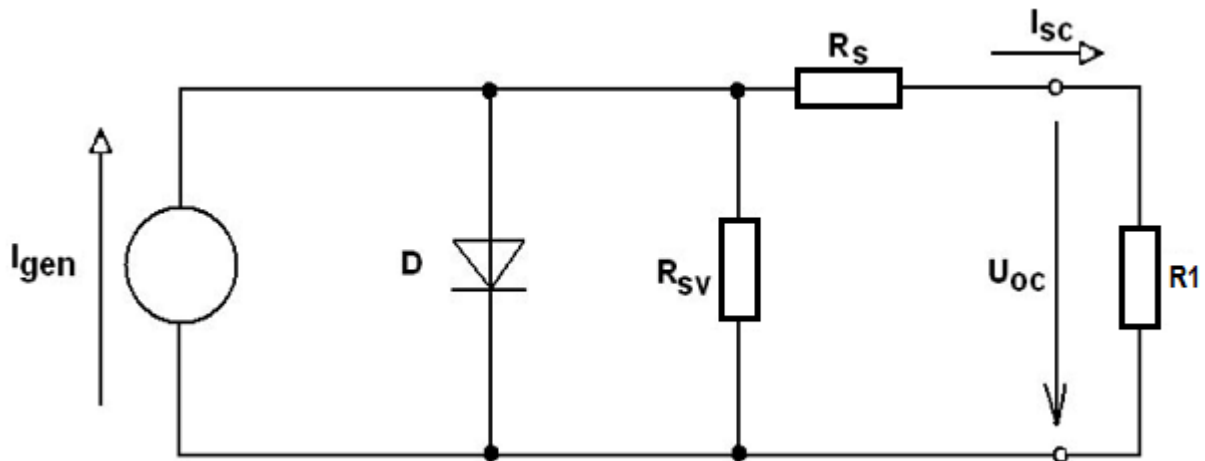
- Mnohovrstvé
- Tenkovrstvé

4.3.3 Rozdělení solárních článků podle počtu přechodů

- Jedno přechodové
- Více přechodové

4.4 Náhradní schéma

Na obr.5 je znázorněno náhradní elektrické schéma solárního článku. Čím vyšší bude intenzita dopadajícího záření, tím větší se pak bude generovat proud I_{gen} , který zajistí co nejvyšší rekombinaci a dojde k růstu výstupního výkonu. Maximální výkon je dán minimálním sériovým odporem R_s (R_s reprezentuje odpor kontaktu a přívodu na PN přechodu, minimalizuje elektrické ztráty) a co největším svodovým odporem R_{sv} . Odpor R_l znázorňuje zátěž solárního článku.

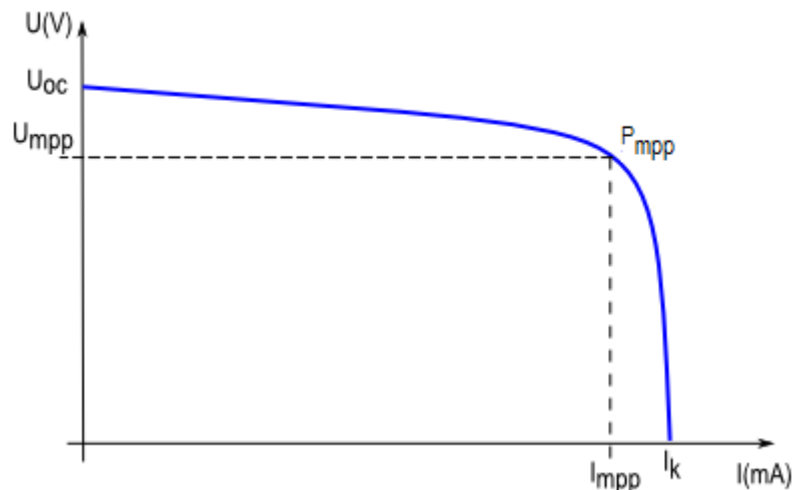


Obr.5: Náhradní elektrické schéma solárního fotovoltaického článku

Více viz. Příloha I: Slunce a fotovoltaika

4.5 Výkon solárních fotovoltaických článků

Elektrické vlastnosti solárních článků se popisují charakteristikou neboli křivkou závislosti proudu na napětí, ukázka této charakteristiky je zobrazena na obr.6. Nejvyšší možnou hodnotou proudu je tzv. zkratový proud I_{sc} , který může článek při dané intenzitě ozáření dodávat. Dalším charakteristickým bodem je napětí naprázdno U_{oc} , které udává maximální napětí článku, kterého je možno dosáhnout, když ke článku není připojen žádný spotřebič.



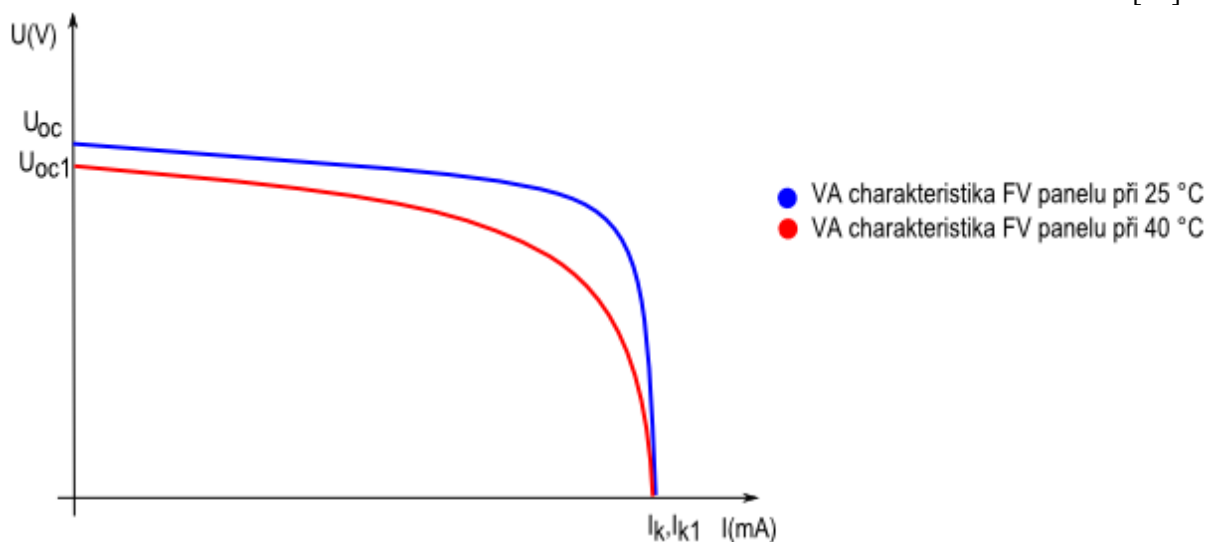
Obr.6: Příklad VA charakteristik

Pro každý článek existuje pracovní bod na charakteristice, ve kterém je výkon největší. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu (MPP) o napětí U_{mpp} a proudu I_{mpp} . Výkon solárního

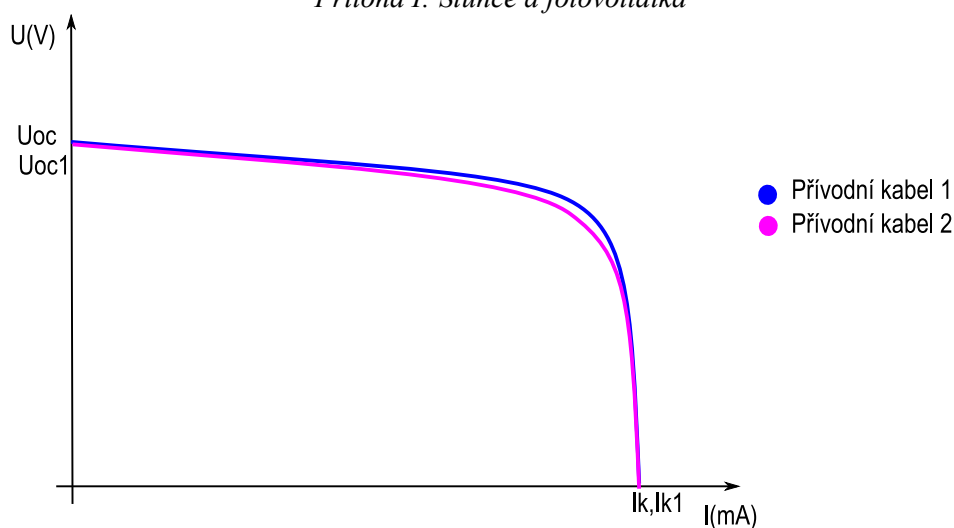
článku se tedy vypočítá jako součin proudu a napětí. Velikost fotovoltaického napětí závisí na několika faktorech, které jsou pro výkon článku určující:

- materiál, ze kterého je fotovoltaický článek vyroben a technologie výroby,
- intenzita dopadajícího světla (podnebí, počasí, poloha a umístění),
- teplota článku,
- čistota povrchu.

[10]



Obr.7: Příklad VA charakteristiky s naznačením jejího posunutí díky teplotním vlivům, více viz. *Příloha I: Slunce a fotovoltaika*



Obr.8: VA charakteristika s vlivem přívodních kabelů

Parametry přívodní kabeláže:

1. přívodní kabel: $l = 15\text{cm}$, $d = 1\text{mm}$, $I_{MAX} = 350\text{mA}$, Cu
2. přívodní kabel: $l = 50\text{cm}$, $d = 1\text{mm}$, $I_{MAX} = 350\text{mA}$, Cu

Pozn.: Odstranění systematické chyby měření přívodní kabeláže je možno realizovat čtyřvodičovým zapojením přívodních vodičů.

4.6 Zvýšení výkonu pomocí spojování fotovoltaických článků

V současnosti se vyrábějí solární fotovoltaické panely v rozsahu výkonu od jednotek wattů do hodnot kolem 200 wattů. Při potřebě výkonu většího než jakého dosahuje jeden modul, lze propojit více panelů mezi sebou do tzv. fotovoltaických polí (někdy se užívají termíny sluneční baterie nebo solární generátor).

Články v panelech a i panely mezi sebou se dají propojit třemi způsoby:

- sériově – pouze zvýšení vyráběného napětí,
- paralelně – pouze zvýšení vyráběného proudu,
- kombinací obou spojení – zvýšení vyráběného proudu i napětí.

Konstrukci fotovoltaického pole by měly tvořit moduly stejného typu od stejného výrobce.

[10]

4.7 Zvýšení výkonu pomocí vnějších prostředků

Zvýšeného výkonu fotovoltaického pole lze dosáhnout i použitím vnějších prostředků, které koncentrují světlo na povrch článků nebo panelů, snižují jejich teplotu nebo je natáčí za Sluncem. Takto lze zvyšovat výkon např. „koncentrací dopadajícího záření“ pomocí několika možných konstrukcí:

- **rovinná zrcadla** – jsou umístěna mezi solární moduly a zvyšují výkon až o 50 procent. Používají se hlavně u konstrukcí, které nesledují dráhu Slunce,
- **optické čočky** – jsou značně masivní, proto se ve větších koncentrátorech používají Frenselovy čočky. Jejich princip ale vyžaduje pro maximalizaci zisku jednoosý nebo dvouosý natáčecí systém konstrukce pro sledování dráhy Slunce,
- **lineární parabolická zrcadla** – dosahují mnohem vyšší koncentrace záření než rovinná zrcadla. Pro větší efektivitu vyžadují alespoň jednoosé sledování dráhy Slunce,
- **složené parabolické koncentrátoři** – jsou známy pod názvem Winstonovy koncentrátoři a jsou obdobou lineárních parabolických zrcadel. Nejsou však citlivé na správné nasměrování, a dají se využívat bez systému sledování dráhy Slunce.

[10]

Pozn.: Více informací je uvedeno v příloze I: Slunce a fotovoltaika.

5 Měřicí metody

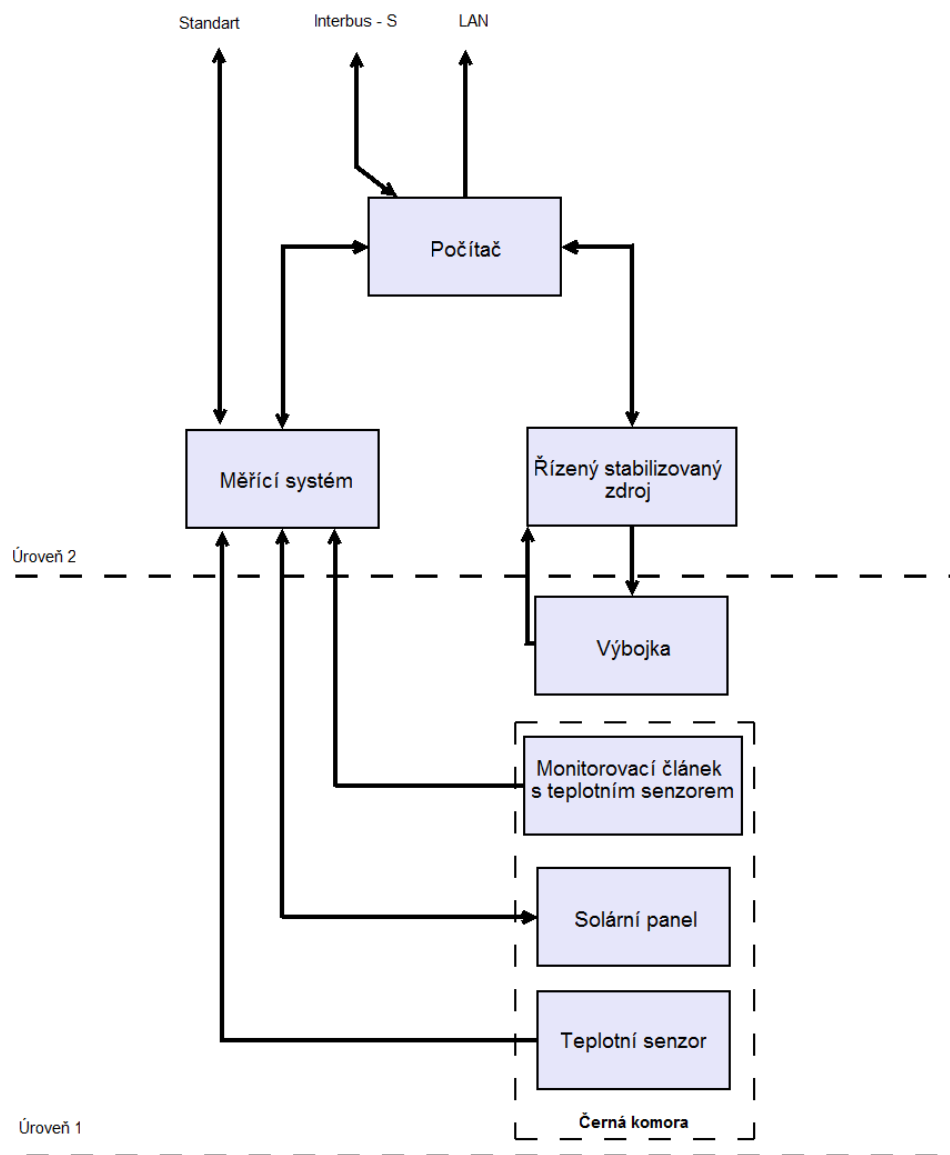
Každý panel se před uvedením na trh testuje na specializovaných přístrojích. Při diagnostice FV panelů rozlišujeme dvě základní skupiny testů.

- Elektrické testy (měření VA charakteristik)
 - Měření propustného napětí za světla
 - Měření závěrného napětí za tmy
 - Měření napětí panelu s R_{ser} a R_{shunt} hodnotami
- Diagnostické testy
 - Metoda sledování mikrop plazmatu
 - Metoda světlem indukovaných paprsků LBI
 - Světelný paprsek indukovaný proudem LBIC
 - Světelný paprsek indukovaný napětím LBIV
 - Fotoluminiscenční detekční metoda
 - Elektroluminiscenční metoda

5.1 Systém měření elektrických vlastností FV článků a panelů

V dnešní době každá firma zabývající se výrobou fotovoltaických panelů má do své výrobní linky zaimplementován systém měření elektrických vlastností fotovoltaických panelů. Takovýto měřicí systém je zobrazen na obr.9 a obsahuje:

- osvětlovací systém,
- kontaktní systém fotovoltaických panelů,
- systém měřící teplotu okolí,
- systém pro měření teploty na srovnávacím monitorovacím FV článku/panelu,
- řídicí a konfigurační systém průběhu testu,
- a jiné.



Obr.9: Blokové schéma měřicího systému pro měření elektrických charakteristik FV článků a panelů

Takovýto měřicí systém měří voltampérové (dále jen VA) charakteristiky FV panelů s dalšími důležitými parametry jako jsou teplota okolí, teplota článku, intenzita záření osvětlení, čas měření a další.

5.2 Měření VA charakteristik FV panelů

Měření VA charakteristik je rozděleno do tří specifických měření:

- měření propustného napětí při osvětlení,
- měření závěrného napětí za běžného osvětlení,
- měření napětí panelu za tmy s R_{ser} a R_{shunt} hodnotami.

5.2.1 Měření propustného napětí při osvětlení

Toto měření se používá při měření napětí na solárním panelu v propustném směru s definovaným osvětlením.

Aby do změřených dat nebyla zanesena chyba je třeba měřící jednotku nakalibrovat. Mezi kalibrační veličiny mohou patřit tyto prvky:

- rozlišení a velikost zobrazení na displeji,
- rozsah zatížení,
- napětí naprázdno,
- měřící rozsah os X a Y,
- napěťový rozsah pro kalkulaci z paralelního odporu (R_{sh}),
- proudový rozsah pro kalkulaci ze sériového odporu (R_{ser}),
- intenzitu záření (W/m^2),
- čas měření,
- počet bodů vykreslovaných do křivky.

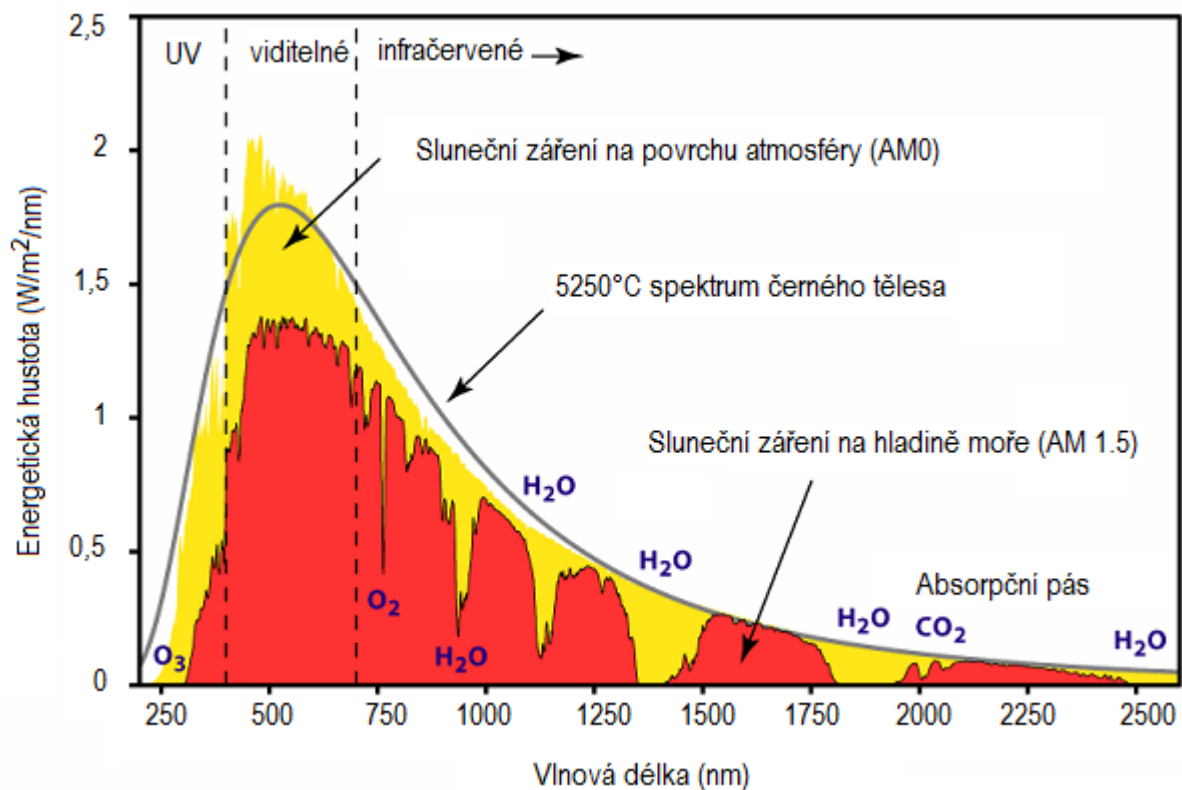
Díky programu se zaznamenávají důležitá data do databáze. Z ní jsou nejčastěji vyčteny na obrazovku nejdůležitější informace o měřeném solárním panelu společně s jeho VA charakteristikou a časovým průběhem jednotlivých veličin.

Úkolem měřicího systému je změřit a vypočítat:

- napětí naprázdno,
- proud nakrátko,
- teplotu panelu,
- teplotu okolí,
- plnicí faktor,
- proud při maximálním bodu výkonu,
- napětí při maximálním bodu výkonu,
- výkon při maximálním bodu výkonu,
- a další.

Tento typ měření je nejrozšířenější díky měřené voltampérové charakteristice panelu, ze které je patrné, zda panel funguje správně a je-li jeho elektrický výkon v rozmezí normy.

[23]



Obr.10: Sluneční spektrum AM0, AM1.5 a spektrum černého tělesa

[24]

Pro měření v průmyslu se používá výbojky se spektrem AM 1.5. Obecně měření VA charakteristik FV panelů by mělo trvat co nejkratší dobu, aby se neuplatňoval vliv teploty. V praxi to bývá přibližně 9 ms.

5.2.2 Měření závěrného napětí za tmy

Při tomto měření je panel umístěn v prostředí s minimálním vybuzením fotovoltaického napětí s dopadajícími fotony (za tmy, šera, denního osvětlení). Obvykle se měření provádí u menších panelů bez ochranných diod.

Při tomto měření nesmí čas měření přesáhnout 50ms, jinak by byla do měření zanesena chyba způsobená ohřevem FV panelu.

Je důležité stejně jako v předchozím případě nejprve měřicí modul nakalibrovat na daný typ měření a solárního panelu.

5.2.3 Měření napětí na panelu za tmy s R_{ser} a R_{shunt} hodnotami

Měření napětí na panelu se provádí za tmy nebo za běžného osvětlení (posun křivky k vyšším proudovým hodnotám).

Dané měření se používá pro vybrané sériové a paralelní odpory FV panelů a to tak, že se do FV panelů dodá elektrická energie předem definované velikosti vzhledem k typu článku a velikosti panelu. Měření se opět provádí co nejkratší dobu nejdéle však 50ms, aby se do měření nezanesla chyba ohřevu FV panelů.

Měřicí funkce je rozdělena do dvou dílčích měření, která jsou optimalizována pro stanovení zkratového odporu R_{shunt} a sériového odporu R_{ser} . Doba měření závisí na impedanci článků.

[23]

Z těchto druhů měření se jeví jako nejdůležitější typ měření VA charakteristik za osvětlení.

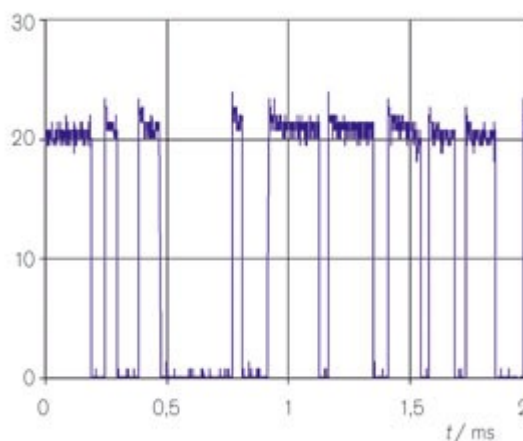
5.3 Diagnostické testovací systémy

Diagnostické testovací systémy jsou založeny na opačné bázi než elektrické měřicí systémy, tzn. že se neměří proud a napětí, které panel dodává při definovaném osvětlení, ale že je panel osvětčován různými typy spekter či je do panelu dodáváno stejnosměrné napětí s proudem v propustném či závěrném směru a takovýto panel je následně snímán pomocí speciálních kamer a získaný obraz je dále zpracováván.

5.3.1 Metoda měření mikroplazmatu

Metoda využívá vzniku lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních defektů při napětí v závěrném směru blízcím se průraznému napětí. Mikroplazma se neprojevuje pouze vyzařováním světelného záření, ale projevuje se i tzv. šumem mikroplazmy.

Šum mikroplazmy byl poprvé studován na křemíkových přechodech P-N polarizovaných v závěrném směru. První informace o šumu tohoto typu byla popsána v roce 1952. Monroe G. McKay zjistil, že v nestabilním stavu je proud přechodem P-N tvořen posloupností impulzů konstantní amplitudy (viz. obr.11) a náhodné doby trvání a vzniku.



Obr.11: Příklad posloupnosti impulzů konstantní amplitudy proudu PN přechodu

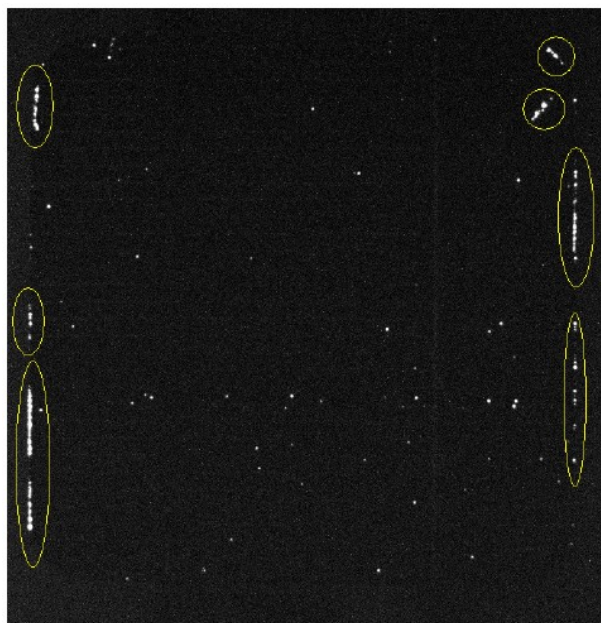
Střední doba trvání impulsu závisí na závěrném napětí na přechodu. První impulzy jsou velmi úzké, při zvyšování závěrného napětí roste jejich šířka, a tím i střední proud, až při dosažení určitého napětí je proud stabilní. Při vyšších napětích se může jev opakovat. Monroe G. McKay tento úkaz interpretuje jako výsledek lavinového průrazu přechodu v lokalizovaných oblastech, jehož následkem je vznik mikroplazmy. Toto vysvětlení bylo potvrzeno v roce 1958, kdy autoři pozorovali rekombinační záření z individuálních oblastí mikroplazmy v mělkých difuzních přechodech a jejich korelaci s bistabilním šumem. Ukázali také, že mikroplazma vzniká tam, kde dislokace protíná přechod.

Vznikající mikroplazmu lze detekovat několika způsoby:

- měřením časového průběhu proudového šumu v závěrném směru,
- měřením charakteristik U-I při použití napájení ze stabilního proudového zdroje,
- měřením efektivní hodnoty úzkopásmového proudového šumu při napájení v závěrném směru proudovým nebo napěťovým zdrojem,
- měřením emise světelného záření z bodových defektů během formování mikroplazmatických výbojů.

Princip vzniku emise záření z mikroplazmy je následující: v místech, kde dislokační porucha (nedokonalost krystalické mřížky) protíná přechod P-N, dochází k lokálnímu lavinovému výboji, který je doprovázen šumem. Tento šum se objevuje při dostatečně velkých závěrných napětích, ale nižších, než je napětí lavinového průrazu. Velikost závěrného napětí potřebného k pozorování tohoto jevu je silně závislé na ploše článku, respektive na výkonu dodaného do článku. Vznik mikroplazmy při výboji v polovodiči je obvykle doprovázen emisí světelného záření, které je zachyceno CCD kamerou a následně analyzováno. V plošném přechodu P-N solárního fotovoltaického článku vzniká mikroplazma v místech, ve kterých je přechod nehomogenní nebo je například poškozen. V oblasti mikroplazmy může protékat značně velký proud, a tím způsobit lokální ohřev v takové úrovni, že může být P-N přechod zničen. Proto je při této metodě nutné pečlivě nastavovat závěrné napětí. Jinak může dojít k nevratnému poškození struktury přechodu P-N a k znehodnocení celého článku.

[28],[31]



Obr.12: Vady odhalené při testu mikroplazmy

[30]

5.3.2 Metoda LBI

LBI (Light Beam Induced) je metoda, kdy světelný paprsek skenuje povrch solárních článků a pomocí měřicího zesilovače signálu je jeho odezva na vybuzení data postupně snímána do počítače a je vytvářena mapa odezvy měřeného článku na světelný paprsek. Podle hlavní měřicí veličiny pak rozlišujeme mezi měřením LBIC (current), LBIV (voltage), případně LBIP (power). Metoda LBIC je takové měření, kdy pomocí převodníku proud–napětí měříme proudovou odezvu, metodou LBIV (Light Beam Induced Voltage) snímáme napěťovou odezvu a u LBIP (Light Beam Induced Power) se snažíme nastavit pracovní bod měřených veličin do bodu maximálního výkonu.

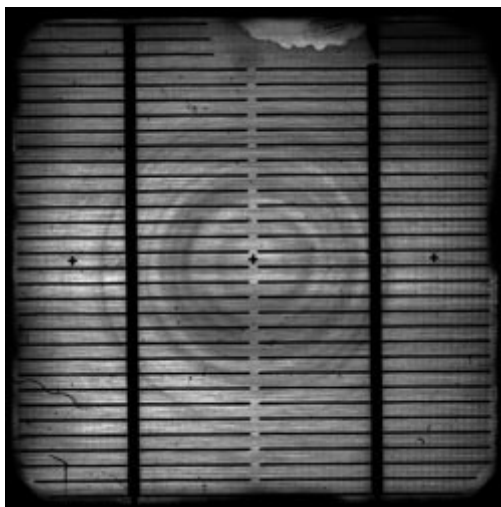
Zajímavých výsledků lze dosáhnout porovnáváním měření LBIC a LBIV při použití různých typů světelných zdrojů a vlnových délek světelného záření.

[28]

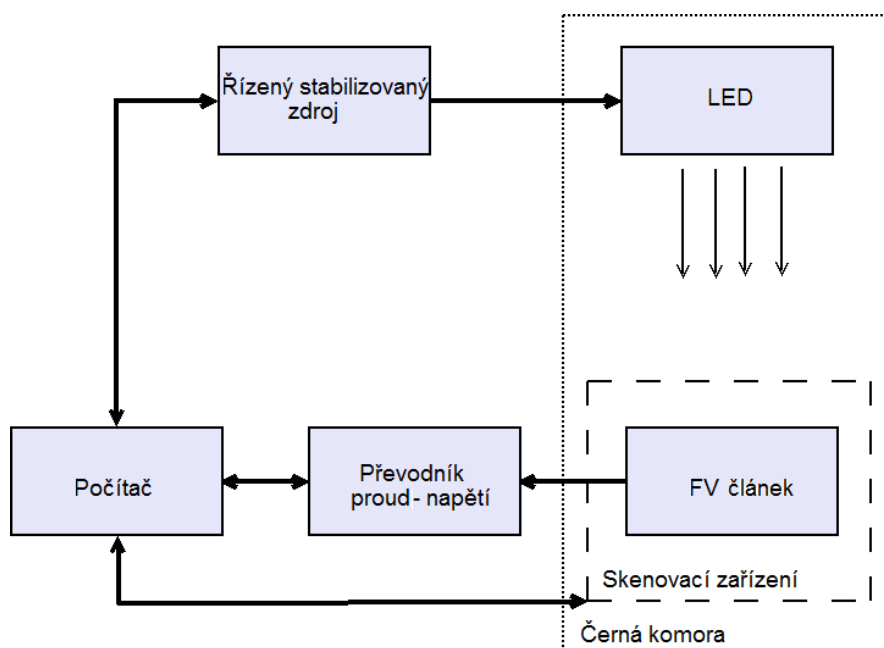
a) Metoda LBIC

Detekční metoda LBIC je používána jako univerzální metoda detekce lokálních defektů nejen ve struktuře solárních článků (viz. obr.13). Vybavení měřicího pracoviště umožňuje jednoduchou výměnu světelného zdroje (viz. obr.14). Za světelný zdroj jsou zde zvoleny LED vysílající záření

s různými vlnovými délkami zaostřené na plochu solárního fotovoltaického článku pomocí speciálního přípravku. Výhodou těchto zdrojů světla je jejich dlouhá životnost a nízké náklady. Různé vlnové délky penetrují v odlišných hloubkách struktury solárního článku a je možno tak vizualizovat objemové a povrchové defekty.



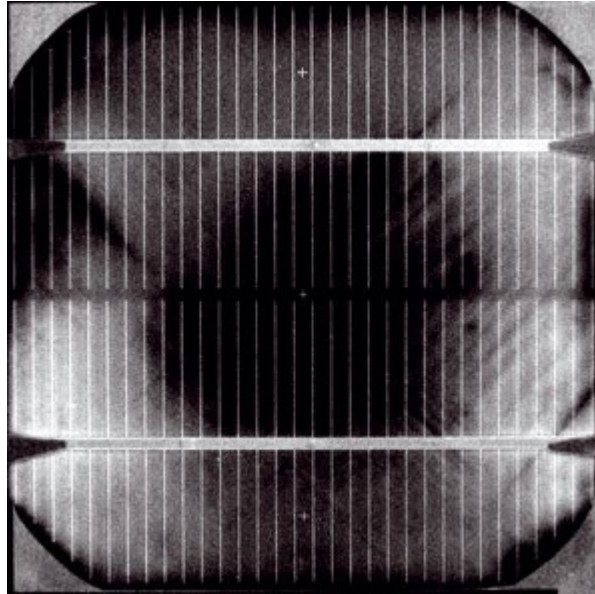
Obr.13: Vizualizace článku testovaného metodou LBIC



Obr.14: Blokové schéma soustavy měřicího pracoviště pro metodu LBIC

V ideálním případě při testování metodou LBIC, kdy by měl převodník proud – napětí nulový vnitřní odpor, by se měřená veličina rovnala hodnotě I_{SC} lokálního osvětlení solárního článku. Pro měření metodou LBIC ale postačuje, aby zátěžový odpor měřicího převodníku byl menší než polovina ideální zátěže maximálního výkonu, což v praxi znamená odpor menší než $0,1 \Omega$.

[28]



Obr.15: Vady odhalené měřením metodou LBIC

Během měření LBIC je světelný paprsek zaostřen na vzorek a díky lokální proudové odezvě z článku získáme charakteristiku rozložení proudu v ploše článku. Získaná data se uspořádají do proudové mapy a v podstatě modelují chování celého článku po jeho jednotlivých částech. Z takto vzniklých proudových map potom můžeme určit většinu lokálních defektů v solárním článku. V dalším kroku je nutné (automaticky nebo ručně) nastavit stupeň šedi zobrazované oblasti pro dobré zobrazení jednotlivých defektů, a to podle nalezených odchylek. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého světelného zdroje (fokusace, vlnová délka – hloubka vniku) a na kroku posunu (míra přesnosti), s jakým se daný vzorek analyzuje.

Výstupem měření je matice číselných hodnot, kterou lze převést na mapu bodů s různým stupněm šedé barvy. Tato mapa signalizuje velikost proudové odezvy a dále ji lze analyzovat běžnými grafickými metodami. V případě potřeby ji lze také matematicky zpracovávat v původní podobě matice hodnot a použít analytické nástroje maticového počtu.

Obě tyto metody LBIC a LBIV mohou vést k podobným závěrům a sloužit k podrobné analýze vlastností fotovoltaických článků a technologických kroků jejich výroby.

[28]

b) Metda LBIV

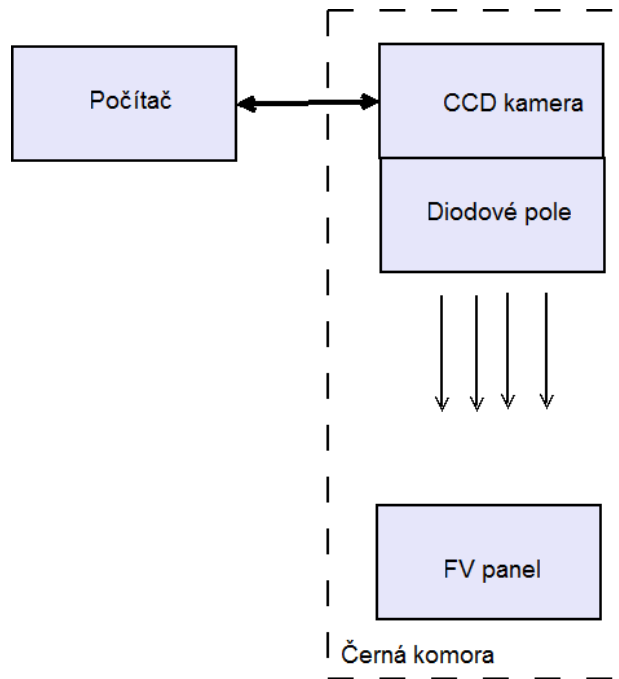
LBIV (Light Beam Inducted Voltages) je další měřicí metodou, která se velice podobá metodě LBIC, protože využívá stejných lokálních světelných mechanismů s různými vlnovými délkami. Tato metoda využívá k měření napětí naprázdno U_{oc} . Dioda opět osvětluje svým úzkým paprskem plochu článku a je posouvána po definovaných krocích v osách X-Y. Signál, odebíraný z článku, je filtrován pomocí pásmové propusti a před vstupem do PC je zesílen. Výsledný obraz je napěťová mapa. Vzorec pro výpočet napěťové odezvy U_{oc} viz.(5.1). Měřicí pracoviště je stejné jako u metody LBIC, viz.obr.14.

$$U_{oc} = \frac{2kT}{e} \ln \left(\frac{-I_{02} + \sqrt{I_{02}^2 + 4I_{01}(I_{02} + I_{01} + AJ_{FV})}}{2I_{01}} \right) [V] \quad (5.1)$$

[32]

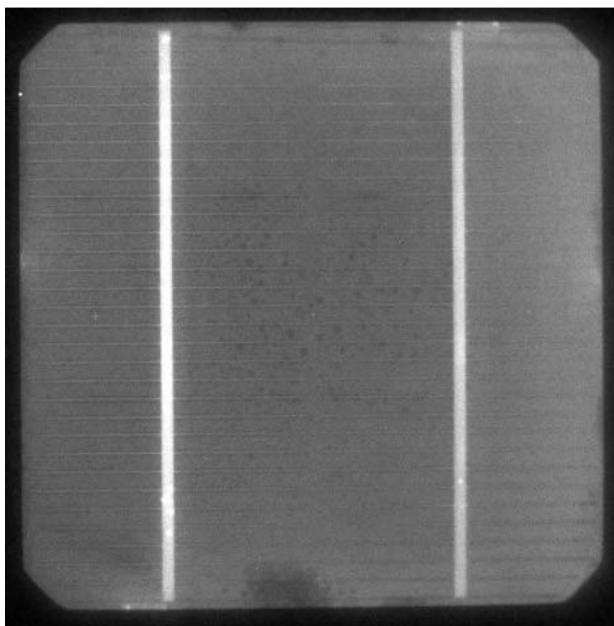
5.3.3 Fotoluminiscenční detekční metoda

Pomocí metody fotoluminiscence se zjišťují nehomogeneity struktury solárních článků. Realizace zapojení měřicího pracoviště je podobné jako u předešlých metod s tím rozdílem, že solární článek není napájen, ale je buzen ultrafialovým zářením například diodovým polem se zářením o vlnové délce 405nm. CCD kamera zachytí světelné záření od ozařovaného fotovoltaického článku přes filtr a výsledný obraz se vykreslí na PC. Fotoluminiscence se často využívá v průmyslu k rychlé detekci defektu solárního fotovoltaického článku (viz. obr.17). Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr.16.



Obr.16: Blokové schéma soustavy pro měření fotoluminiscenční metodu

Obecně je fotoluminiscence druh luminiscence vyvolaný energií dopadajícího elektromagnetického záření. Řídí se Stokesovým zákonem, podle něhož má vybuzené světelné záření vždy větší vlnovou délku (menší energii) než budící záření. Proto lze luminiscenci vyvolat jen výjimečně viditelným světlem, obvykle je třeba použít ultrafialové nebo rentgenové záření. Fotoluminiscenční zobrazení se ukazuje jako rychlý charakteristický nástroj, dovolující variace doby života minoritních nosičů náboje uvnitř velké plochy křemíkových vrstev, měřící s velkým prostorovým rozlišením a s daty získanými během jediné sekundy.



Obr.17: Ozářený FV článek UV led při fotoluminiscenci

[32]

5.3.4 Elektroluminiscenční metoda

Elektroluminiscence je děj, při němž elektrony přeskakují z vyšší energetické hladiny do nižší, což vyvolá vznik elektromagnetického záření. Platí zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti rekombinujících elektronů.

U polovodičů s přímým mezipásmovým přechodem, jako je GaAs, při rekombinaci páru elektron – díra je vysoká pravděpodobnost vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Této vlastnosti se využívá u LED diod a polovodičových laserů.

U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se při generačně-rekombinačních dějích kromě energie fotonů účastní i fonony (tepelné kmity krystalografické mřížky). Z tohoto důvodu tyto materiály nejsou vhodné pro optoelektroniku. Přestože je pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u těchto polovodičů nižší a je tu větší neurčitost energie vyzářeného fotonu, lze tuto metodu použít pro generování světelné emise a s její pomocí analyzovat struktury polovodičových přechodů P-N, jako jsou solární články.

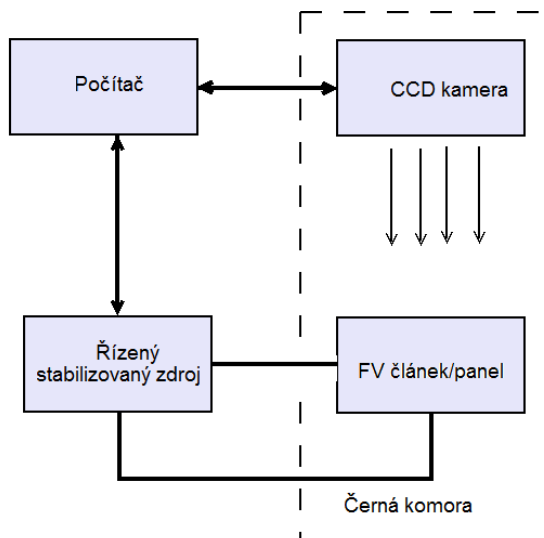
[28]

Elektroluminiscenční test, dále jen ELCD test, umožňuje detekci, respektive zviditelnění materiálových a výrobních vad solárního článku. S jeho pomocí lze vyhodnotit jak kvalitu výrobního procesu článků, tak i případné defekty vzniklé při pozdější manipulaci s fotovoltaickými moduly. Dokáže odhalit skryté vady, nezjistitelné jinými metodami (např. flash test, V-A charakteristiky, termokamera).

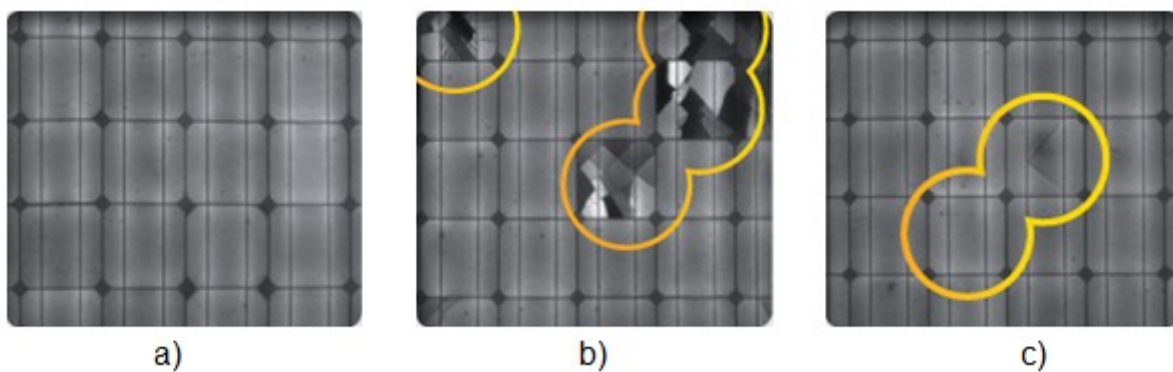
Především mikropřaskliny mají zásadní vliv na dlouhodobou stabilitu výkonových parametrů fotovoltaických panelů. Během měření můžeme pozorovat rozložení proudové hustoty v článku.

Záření FV článku nebo modulu v blízké infračervené oblasti je snímáno speciální kamerou a výsledný obraz umožňuje nahlédnout do vnitřní, pouhým okem neviditelné, struktury fotovoltaického článku nebo panelu. Celá měřicí soustava (viz.obr.18) je uzavřena v temné komoře.

Jako snímací prvek jsou zde použity senzory citlivé na světelné záření v infračervené oblasti.



Obr.18: Blokové schéma testovacího zařízení pro ELCD test



a) FV panel bez vad, b) nefunkční FV panel, c) FV panel s prasklými články

Obr.19: Ukázka výsledků měření FV solárních panelů metodou ELCD chlazenou CCD kamerou

[28]

6 Realizace vybraných metod

Z výše uvedených metod se jako nejefektivnější jeví metody měření VA charakteristik při osvětlení a měření FV panelu elektroluminiscenční metodou.

Tyto dvě uvedené metody byly realizovány pro menší FV panely, které byly vyrobeny v laboratořích VŠB – TUO.

6.1 Elektrická metoda – měření VA charakteristik při osvětlení

6.1.1 Měření VA charakteristik při osvětlení

V tomto měření se měří voltampérová charakteristika tří solárních panelů při definovaném proměnném osvětlení. Mechanická soustava měřicího systému umožňuje měnit vzdálenost mezi světelným zdrojem a měřeným FV článkem nebo panelem a pozorovat následující změny:

- změna VA charakteristiky v závislosti na intenzitě osvětlení,
- změna VA charakteristiky v závislosti na oteplení solárních panelů.

Měřicí soustava je realizována pro solární panely do 1dm^2 , které byly vyrobeny v laboratořích VŠB –TUO jako demonstrační panely pro laboratorní měření k vozítkům „Sluneční poskakovač“ v rámci Programu „Napájení Sluncem“.

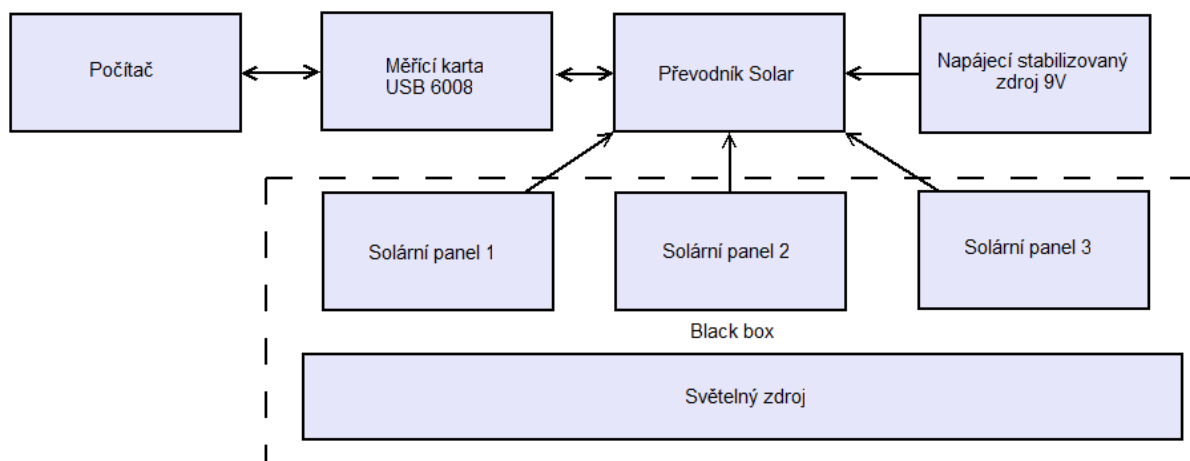
Měřicí soustava (obr.20) je realizována měřicí kartou a převodníkem řízeným počítačem.



Obr.20: Fotografie realizované měřicí soustavy pro měření VA charakteristik solárních článků nebo panelů

6.1.2 Technické prostředky pro měření VA charakteristik FV článků

Soustava pro měření VA charakteristik FV článků nebo panelů je realizována prostřednictvím počítače, měřicího modulu USB 6008, převodníku Solar, 9V stabilizovaného zdroje, měřených solárních panelů a světelného zdroje.



Obr.21: Blokové schéma soustavy pro měření VA charakteristik

Světelný zdroj je v tomto případě realizován dvěma halogenovými svítilny v průmyslových armaturách s příkonem 150W.

Pozn.: Pro realizaci měření a demonstrační laboratorní úlohy bylo zvoleno toto osvětlení z ekonomických důvodů. Toto osvětlení však není příliš vhodné pro měření VA charakteristik, viz. Příloha II: Měření spekter umělého osvětlení.

a) Měřicí modul USB 8006

Zařízení USB-6008 (viz.obr.22) je vybaveno 8 analogovými vstupními kanály AI, 2 analogovými výstupními kanály AO, 12 obousměrnými digitálními linkami DIO a jedním 32-bitovým čítačem C. Připojuje se přes komunikační rozhraní USB 2.0 full-speed.



Obr.22: Měřicí modul USB6008

| Vlastnost | USB-6008 |
|--|---|
| Rozlišení AI | 12 bitů diferenciálně 11 bitů na společnou zem (RSE) |
| Max. vzorkovací rychlost AI, pro jeden kanál * | 10 kSa/s |
| Max. vzorkovací rychlost AI, pro několik kanálů * | 10 kSa/s |
| Technologie DIO | Open collector |
| * Může záviset na připojení Pc | |

Tab.3: Základní vlastnosti modulu USB -6008

| Signál | Reference | Směr | Popis |
|--------------------------|-----------|-------------------------|--|
| GND | - | - | Zem (ground) – referenční bod pro AI zapojené na společnou zem (RSE), pro vyrovnávací proudy při diferenciálním zapojení AI, pro AO kanály, digitální linky a pro napětí +5VDC a +2,5VDC |
| AI<0...7> | Různě | Vstup | Analogové vstupy 0 až 7 – při zapojení na společnou zem tvoří každá svorka individuální kanál. Při diferenciálním zapojení se kladný pól kanálu 0 připojuje na svorku AI 0 a záporný na AI4. Analogicky pak <AI 1, AI5>, <AI 2, AI 6> a <AI 3, AI 7>. |
| AO 0 | GND | Výstup | Analogový výstup 0 - napětí |
| AO 1 | GND | Výstup | Analogový výstup 1 - napětí |
| P1.<0...3> P0.<0...7> | GND | Vstup nebo výstup | Digitální I/O linky – každou linku zvlášť lze programově nastavit jako vstup nebo výstup |
| +2.5V | GND | Výstup | +2,5VDC – referenční zdroj napětí, max. 1mA |
| +5V | GND | Výstup | +5VDC – zdroj napětí +5V, max. proud 200mA |
| PFI 0 | GND | Vstup | Svorka PFI 0 je programově nastavitelná pro digitální trigger nebo pro čítání hran |

Tab.4: Popis signálů modulu USB 6008

b) Převodník Solar

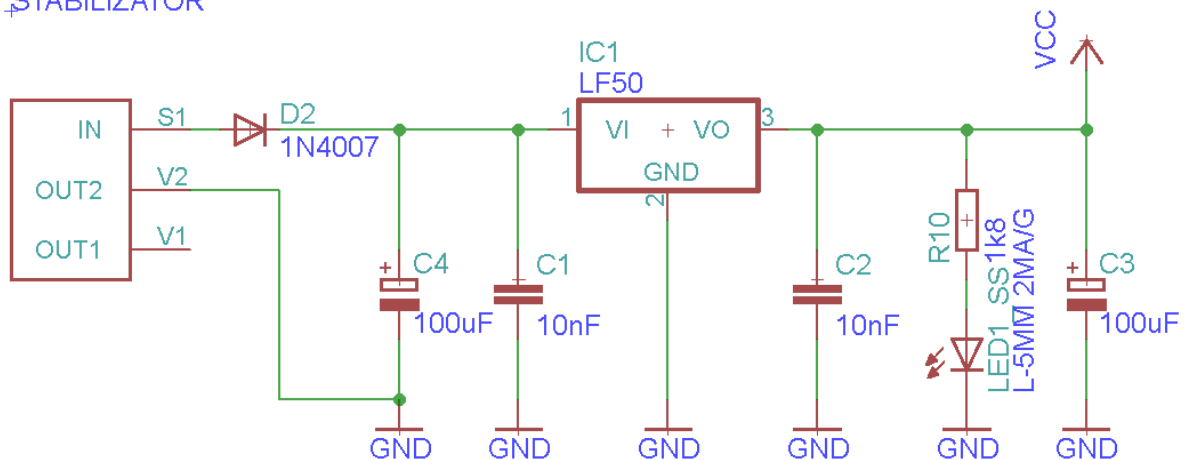
Měřicí deska *Solar* se skládá z několika částí:

- stabilizační část
- měření osvětlení
- měření teploty
- měření proudu a napětí pro VA charakteristiku.

Stabilizační část

Z důvodu přesnosti měření bylo nutné nejprve stabilizovat napájecí napětí soustavy. Jelikož je převodník napájen 5V byl tento požadavek proveden klasickým zapojením stabilizátoru napětí LF50. Na výstupu je schéma doplněno obvodem signalizace činnosti zdroje diodou LED, viz.obr.23.

STABILIZATOR



Obr.23: Schéma stabilizátoru

Napájení stabilizátoru je realizováno síťovým adapterem s nastavitelným napětím na 9V. Vstup je opatřen diodou D2 typu 1N4007, která zabráňuje případnému poškození obvodu při přepólování.

Hodnoty kondenzátoru byly zvoleny dle specifikace výrobce stabilizátoru. Předřadný rezistor R10 musí zabezpečit stav, kdy na LED je napětí U_F a diodou protéká proud I_F (viz. 6.1). Při tomto stavu LED dioda dostatečně svítí a není přetěžovaná.

Pro signalizaci byla zvolena zelená LED dioda o průměru 5mm, těchto parametrů:

$$U_F = 1,9 \text{ V}$$

$$\lambda = 568 \text{ nm}$$

$$I_F = 2 \text{ mA}$$

$$R_{10} = \frac{U_{R1}}{I_F} = \frac{U_{OUT} - U_F}{I_F} = \frac{5 - 1,9}{0,002} = 1550 \Omega \text{ z řady E12} \rightarrow 1k8 \quad (6.1)$$

Výkonové zatížení odporu R10:

$$P_{R1} = U_{R10} * I_F = \frac{U_{R10}^2}{R_1} = I_F^2 * R_{10} = 0,002^2 * 1550 = 6,2 * 10^{-3} \text{ W} \quad (6.2)$$

Výpočet chladiče:

$$U_{IN} = 9 \text{ V}$$

$$U_{OUT}=5V$$

$$I_{OUT}=300mA$$

Ztrátový výkon stabilizátoru bude:

$$P_z = (U_{IN} - U_{OUT}) * I_{OUT} = (9 - 5) * 0,3 = 1,2W \quad (6.3)$$

Parametry stabilizátoru:

$$T_{Jmax} = 125^{\circ}C,$$

$$R_{TH J-C} = 3 \frac{^{\circ}C}{W},$$

$$R_{TH J-A} = 50 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$\Delta T = P_z * \sum R_{TH}$$

$$R_{TH} = \frac{T_{Jmax} - T_{Amax}}{P_z} = \frac{125 - 35}{1,2} = 75 \frac{^{\circ}C}{W} \quad (6.4)$$

Parametry chladiče:

Druh chladiče: V7141

Rozměry: 25 x 15 x 17mm

$$R_{TH chladiče} = 17 \frac{^{\circ}C}{W}$$

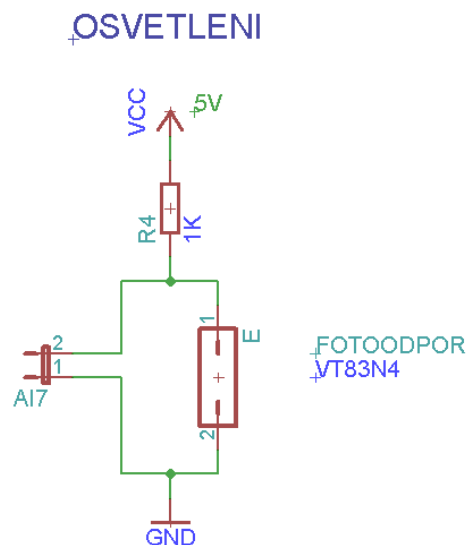
$$T_J = [P_z * (R_{TH J-C} + R_{TH chladiče})] + T_{Amax} = [1,2 * (3 + 17)] + 35 = 59^{\circ}C \quad (6.5)$$

Z předchozích výpočtů vyplývá, že chip TL50 je nutné chladit chladičem V7141.

Měření osvětlení

Při měření solárních panelů je velmi důležité vědět, při jakém osvětlení daný panel měříme. Neboť při velké intenzitě světla bude panel produkovat větší proud než při malém osvětlení.

Z tohoto důvodu je do měřicí soustavy zabudováno čidlo, přes které měříme intenzitu osvětlení. Toto čidlo je realizováno (viz.obr.24) fotoodporem typu VT83N4, které pracuje na principu změny odporu v závislosti na intenzitě osvětlení.



Obr.24: Schéma zapojení čidla VT83N4.

Výstup z tohoto čidla je napojen na analogový vstup měřicího modulu AI7.

Měřením bylo zjištěno, že při intenzitě světelného záření 1500lux má toto čidlo odpor 960Ω.

$E=1500\text{lux}$

$R_i=960\ \Omega$

$U=5\text{V}$

$R_4=?$

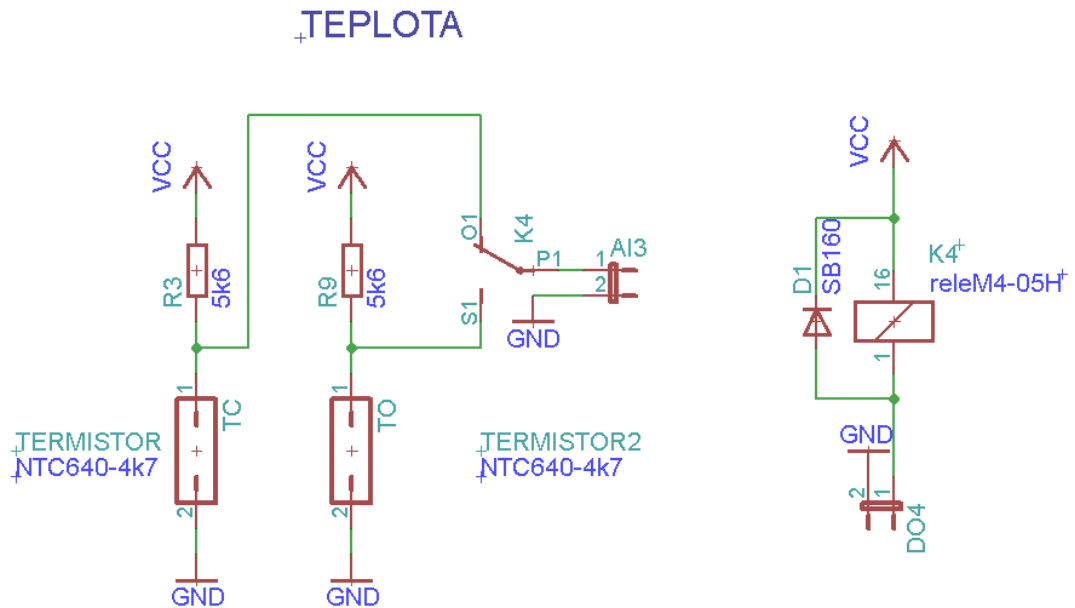
$$R_4 = \frac{R_{foto}(U - \frac{1}{2}U)}{\frac{1}{2}U} = \frac{960 * (5 - 2,5)}{2,5} = 960\Omega \quad (6.6)$$

Hodnota odporu R_4 byla zvolena 1kΩ.

Měření teploty

Dále je zde nutno měřit teplotu článku a okolního prostředí, neboť se vzrůstající teplotou účinnost článků klesá.

Teplota okolí i teplota článku je realizována teplotním čidlem NTC640-4k7.



Obr.25: Schéma zapojení čidla NTC640

Měření teplot muselo být realizováno přepínáním mezi dvěma čidly (viz.obr.25) přepínacím relé M4-05H z důvodu nedostatku vstupních analogových výstupů.

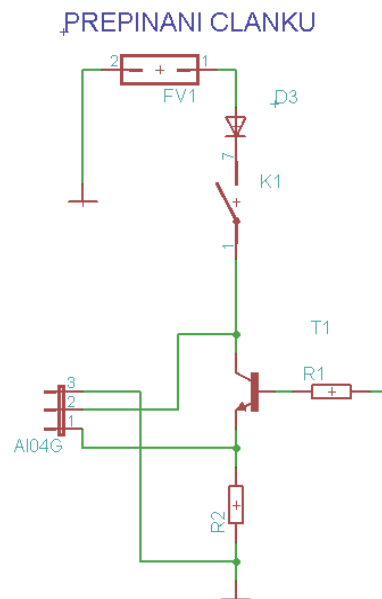
Z kontrolního měření vyplynulo, že čidlo NTC640 má při teplotě 25°C hodnotu odporu 5,54kΩ.

$$R_4 = \frac{R_{term} (U - \frac{1}{2}U)}{\frac{1}{2}U} = \frac{5540 * (5 - 2,5)}{2,5} = 5540\Omega \quad (6.7)$$

Hodnota odporu R3 a R9 je 5k6.

Měření VA charakteristiky pomocí tranzistoru

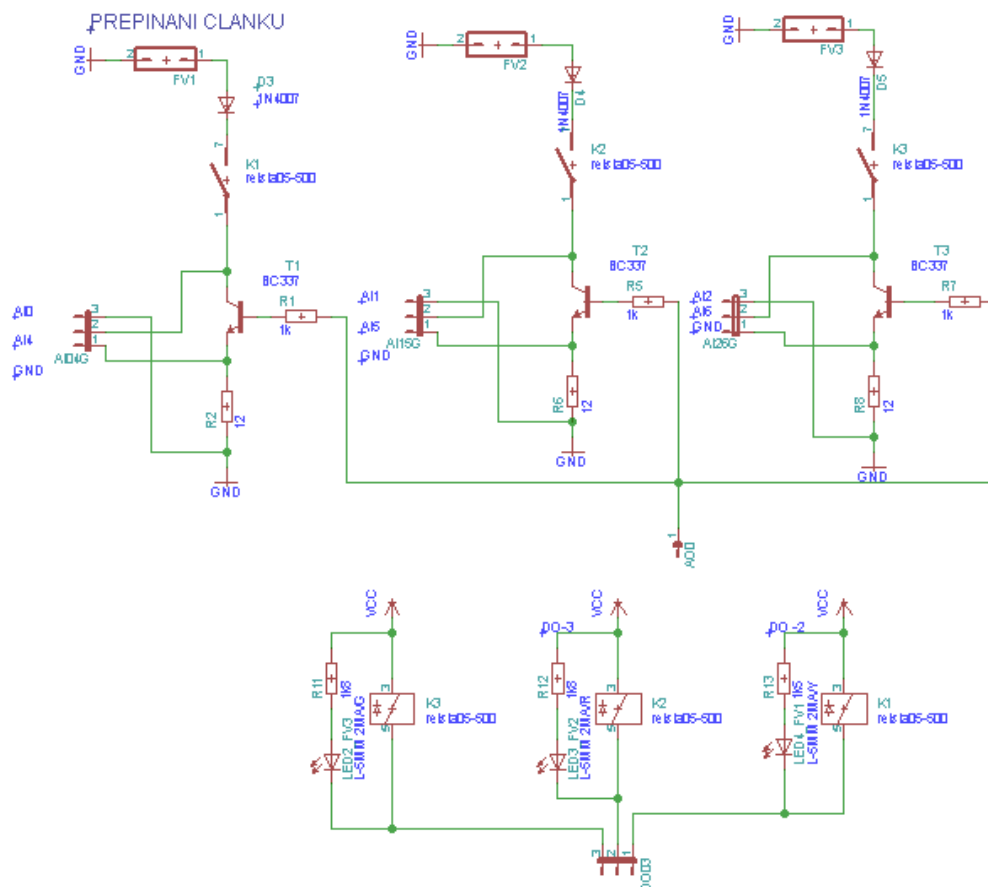
Samotné měření voltampérové charakteristiky je realizováno tranzistorem BC 337 (viz.obr.26) na nichž se měří úbytek napětí a to tak, že se postupně otevírá báze tranzistoru (řízeno pomocí analogového výstupu) a v určitých krocích se měří napětí, ze kterého se pomocí programu vypočítávají další údaje.



Obr.26: Schéma zapojení tranzistoru BC 337.

Vzhledem k možnosti měření 3 solárních panelů najednou je měření VA CHA-KA realizováno přepínacími relé (obr.27). Toto přepínání je řízeno digitálním výstupem měřicího modulu a aplikačním programovým vybavením.

Zabránění přepólování při připojování panelů je zajištěno typem připojovacího konektoru.



Obr.27: Schéma soustavy měření pro 3 solární články

Hodnota odporu $R_2, R_6, R_8 = 12\Omega$ zvolena.

$$I_B = \frac{I_{cmax}}{h_{21E}} = \frac{0,350}{200} = 0,00175A = 1,75mA \quad (6.8)$$

$$R_E * I_{cmax} + U_{BE} + R_B * I_B = U_{AO}$$

$$R_B = \frac{U_{AO} - R_E * I_{cmax} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 12 * 0,35 - 0,65}{0,00175} = 86\Omega \quad (6.9)$$

Odpor do báze byl zvolen z řady E12 na $1k\Omega$.

Pro signalizaci byly zvoleny LED diody o průměru 5mm různých typu barev:

zelená

$$U_F = 1,9 V$$

$$\lambda = 568nm$$

$$I_F = 2 mA.$$

$$R_{11} = \frac{U_{R1}}{I_F} = \frac{U_{OUT} - U_F}{I_F} = \frac{5 - 1,9}{0,002} = 1550\Omega \rightarrow 1k8 \quad (6.10)$$

žlutá

$$U_F = 1,9 V$$

$$\lambda = 585nm$$

$$I_F = 2 mA.$$

$$R_{12} = \frac{U_{R1}}{I_F} = \frac{U_{OUT} - U_F}{I_F} = \frac{5 - 1,9}{0,002} = 1550\Omega \rightarrow 1k8 \quad (6.11)$$

červená

$$U_F = 2,2 V$$

$$\lambda = 635nm$$

$$I_F = 2 mA.$$

$$R_{13} = \frac{U_{R1}}{I_F} = \frac{U_{OUT} - U_F}{I_F} = \frac{5 - 2,2}{0,002} = 1400\Omega \rightarrow 1k5 \quad (6.12)$$

Jednotlivé výstupy z přípravku Solar jsou připojeny na příslušné porty měřicího modulu USB 6008, viz tab.5.

| Měřicí karta USB 6008 | Přípravek SOLAR | Připojení DPS |
|-----------------------|-------------------|---------------|
| GND | GND | AI04G |
| AI0 | Napětí na solar 1 | |
| AI4 | Proud na solar 1 | |
| | GND | AI15G |
| AI1 | Napětí na solar 2 | |
| AI5 | Proud na solar 2 | |
| GND | GND | |

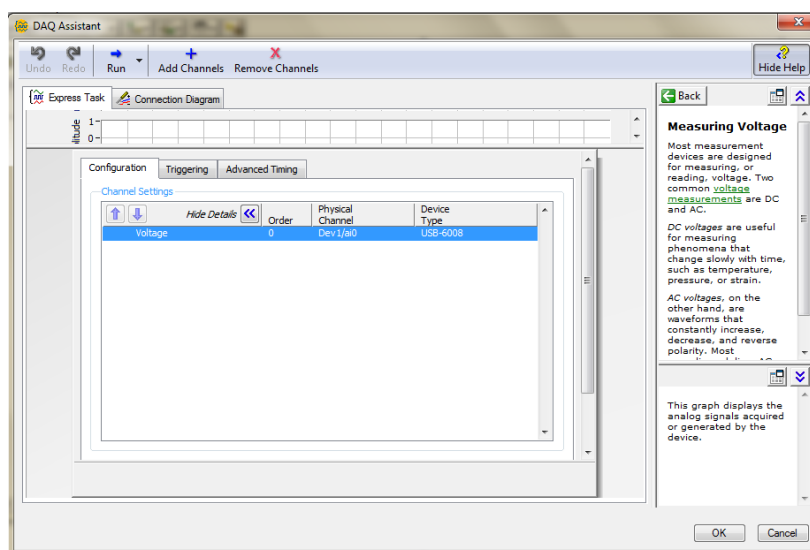
| | | |
|------|-------------------|---------|
| AI2 | Napětí na solar 3 | AI26G |
| AI6 | Proud na solar 3 | |
| GND | GND | AI3 |
| AI3 | Teplotní čidlo | |
| AI7 | Čidlo intenzity | AI7 |
| GND | GND | |
| AO0 | Napěťové úrovně | AO0 |
| GND | GND | digital |
| P0.0 | Přepínání relé | DO13 |
| P0.1 | Přepínání relé | |
| P0.2 | Přepínání relé | |
| P0.3 | Přepínání relé | DO4 |

Tab.5: Propojení měřicího modulu s přípravkem Solar

6.1.3 Programové vybavení

Programové vybavení je realizováno pomocí prostředí LabView od firmy National Instruments pro modul USB 6008.

Aby bylo možné pracovat s daty z jednotlivých kanálů je nutné je správně propojit s programem. K tomu účelu slouží v LW DQA asistent (viz.obr.28), kde se nastaví příslušný port, ze kterého chceme data snímat nebo na který je chceme posílat.



Obr.28: Obrazovka prostředí DQA asistent

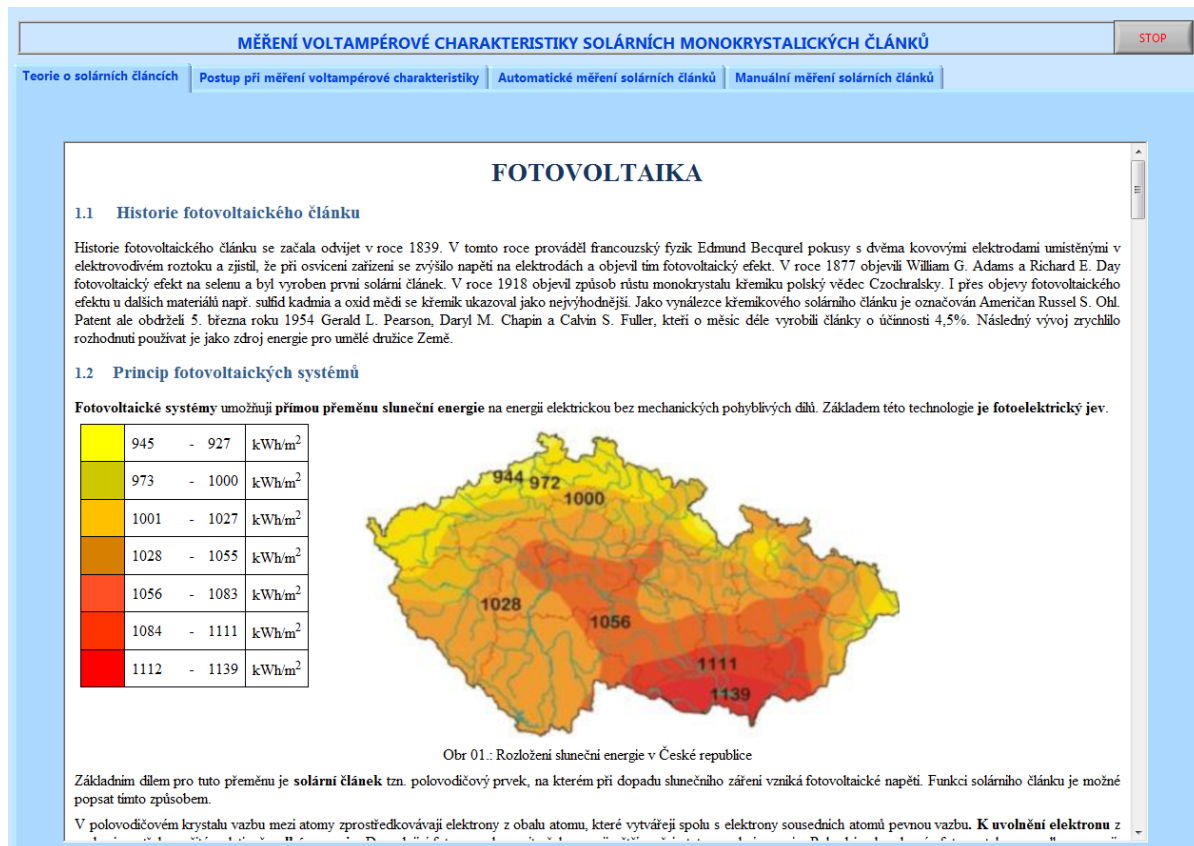
Po tomto propojení pracujeme s daty pouze virtuálně.

Aplikační programové vybavení Solar je rozděleno pro přehlednost do 4 částí:

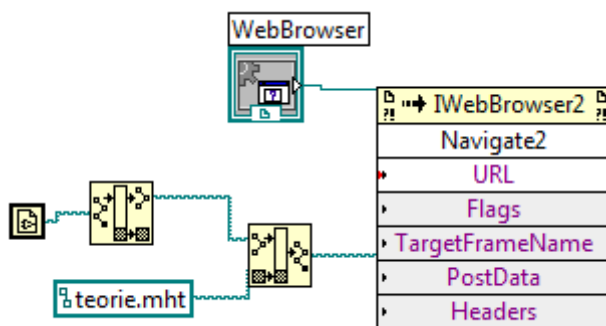
- teorie solárních článků,
- postup měření VA charakteristiky,
- automatické měření VA charakteristik,
- manuální měření VA charakteristik.

a) Teorie solárních článků a fotovoltaických systémů

První část (obr.29) obsahuje základní informace o solárních článcích, jejich výrobě, rozdělení, užití a důležitých vlastnostech solárních článků.



Obr.29: Ukázka okna s teoretickým úvodem do problematiky fotovoltaických solárních systémů



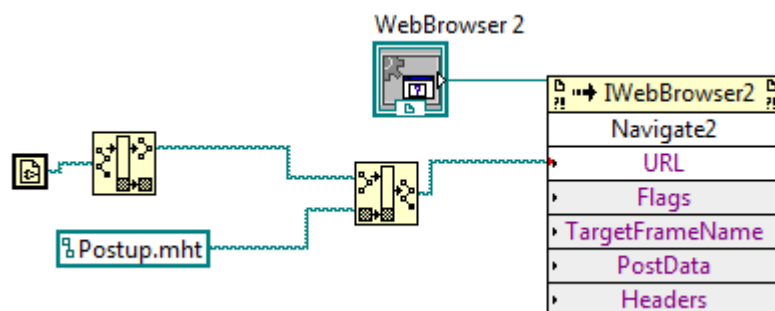
Obr.30: Kód programu části teorie solárních článků

Jak je z kódu patrné (viz.obr.30), dané informace jsou vyvolávány z uloženého souboru, který se nachází ve stejné složce jako program, ve formátu html stránky. Soubor je načítán do webového prohlížeče.

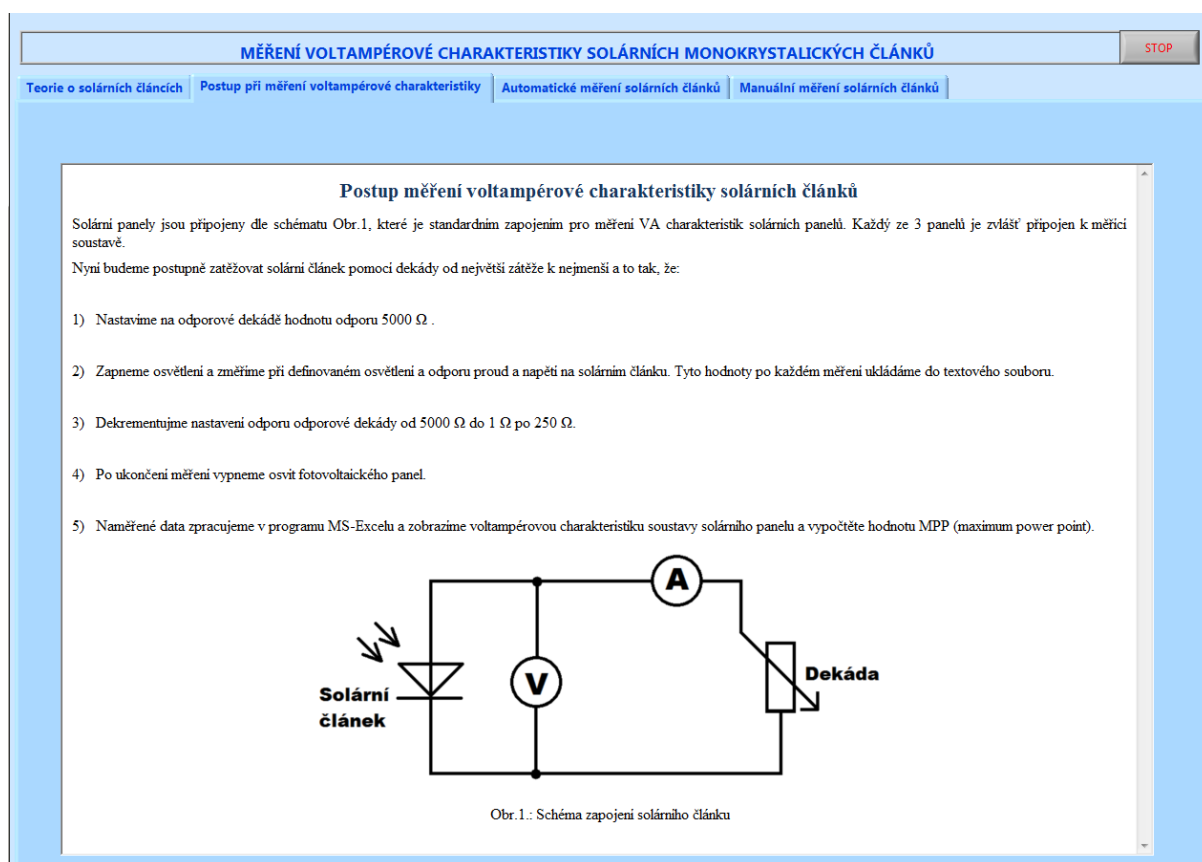
Tento způsob načtení je zvolen pro snadnost propojení s prostředím LabView a jeho možné úpravy a další rozšiřování informačního obsahu.

b) Postup měření voltampérové charakteristiky solárních článků

Obdobným způsobem je vyřešeno načítání teoretického základu o měření VA charakteristik.



Obr.31: Kód programu pro vyvolání postupu měření VA charakteristik.



Obr.32: Ukázka vzhledu části programu s teoretickým základem o měření VA charakteristik

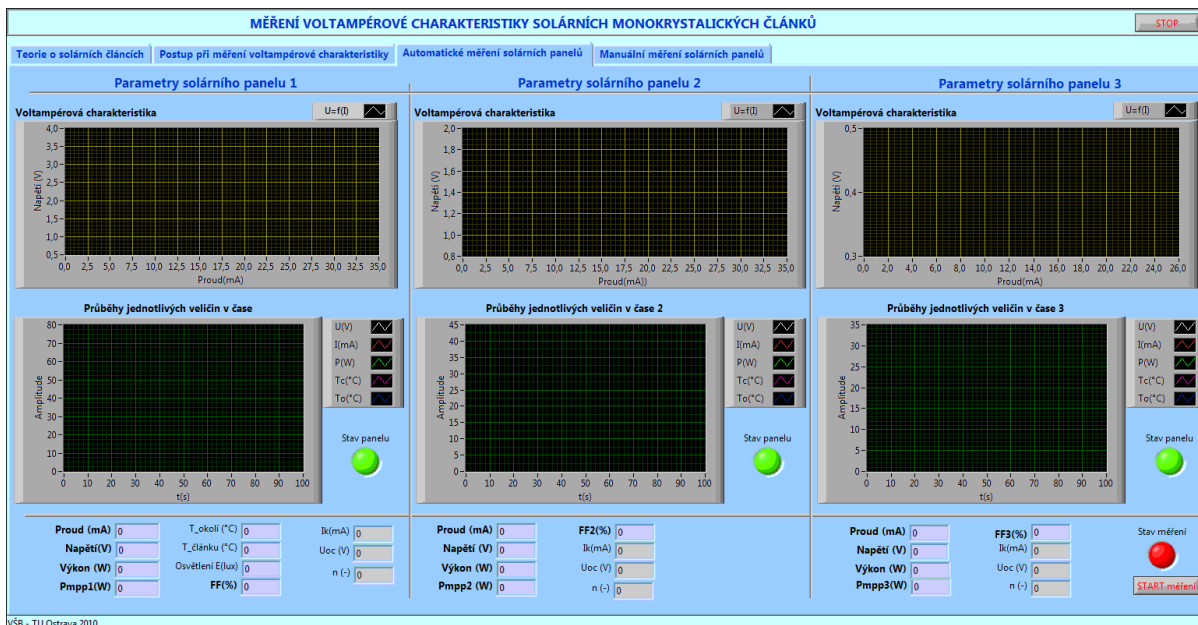
c) Automatické měření solárních panelů

Další funkcí aplikačního programu je automatické měření VA charakteristik solárních článků, viz. obr.33.

Před spuštěním této části je nutno zkontrolovat, zda jsou panely zapojeny do měřicího přípravku a zapnout osvitovou jednotku.

Měřicí cyklus se spustí po stisknutí tlačítka *START měření*. Program se dotáže třikrát (pro každý panel zvlášť), kde mají být uložena budoucí data (data jsou ukládána ve formátu .txt) po zadání cesty začne program měřit VA charakteristiky zapojených článků. Stav tohoto procesu je indikován virtuální LED *stav měření*.

V průběhu měření se zobrazují aktuální měřené hodnoty napětí, proudu, výkonu, teploty článku, teploty okolí a osvětlení. Po skončení měření se vypočítají zbývající hodnoty: bod maximálního výkonu a plnicí faktor. Automatický měřicí cyklus, který trvá několik sekund, je možno zastavit pomocí virtuálního tlačítka *STOP měření*.



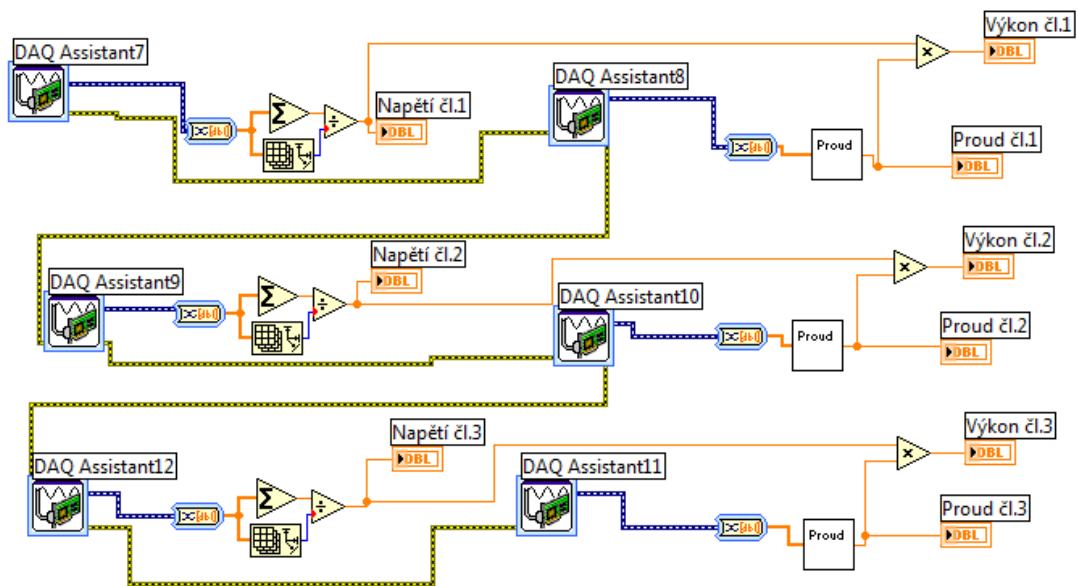
Obr.33: Vizualizace procesu automatického měření solárních článků

Sledování teplot jak okolí, tak článků jsou velmi důležité, a to z toho důvodu, že se vzrůstající teplotou klesá účinnost článků. Informace o tomto jevu jsou zpracovány v doprovodné příloze III: Měření teplotních vlivů na fotovoltaický článek.

Tato část programu jak již bylo řečeno, umožňuje změření VA charakteristik všech 3 panelů automaticky a najednou.

Sběr dat pro VA charakteristiku se provádí pomocí SUB VI „získávání hodnot“. Kód programu je velmi jednoduchý, jak je vidět na obr.34. Data vystupují z DQA asistentu a ukládají se do pole. Z pole se jednotlivé položky sumarizují a dělí velikostí, na výstupu tohoto cyklu je aktuální napětí na článku. Hodnota proudu je získávána obdobným postupem.

Jelikož modul snímá pouze napětí, je nutné toto napětí převést pomocí jednoduchého výpočtu, který je v samostatné SUB VI, na proud.



Obr.34: Programová část automatického měření VA charakteristik solárních článků

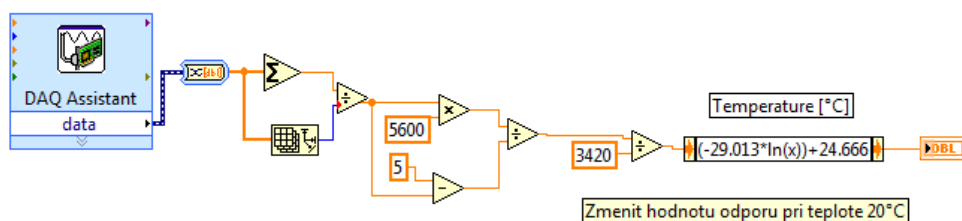
Princip automatického měření solárních článků spočívá v nastavení digitálních vstupů do logického stavu H. Následně se nastavuje počáteční hodnota na L, aby postupné zatěžování nabíhalo od počáteční hodnoty. Pro VA charakteristiku se měří 100 hodnot, což je zaručeno smyčkou For Loop, která je nastavená tak, aby měření proběhlo 100krát.

V této smyčce je umístěna sekvence následných měření. Jako první je vyčítán proud a napětí z článků a jejich výkon. Následně se z těchto změřených hodnot zobrazí graf VA charakteristik.

Každá změřená hodnota proudu a napětí jednotlivých článků se ukládá do souboru pro každý článek zvlášť. Uložení a pojmenování souboru si volíme při spuštění tohoto měření, jak již bylo řečeno výše. Data jsou ukládána do souboru .txt, aby je bylo možné posléze snadno přenést např. do MS Excel a s naměřenými daty dále pracovat.

Následně se změří intenzita osvětlení (SUB VI osvětlení – v tomto SUB VI se přepočítává hodnota napětí pomocí křivky osvětlení na měřené osvětlení). Vliv světla na VA charakteristiku je zanesen do přílohy 2 -Měření spekter umělého osvětlení. Následně se měří teplota článků (viz.obr.35) a okolí pomocí SUB VI k tomu určených. Princip měření osvětlení je založen na stejném principu jako měření teplot a to tak, že je změřena hodnota napětí, která se následně přepočte pomocí křivky daného senzoru na požadovanou veličinu.

Všechny změřené hodnoty se ukládají do všech tří souborů k napětím a teplotám daných článků.



Obr.35: Měření teploty okolí

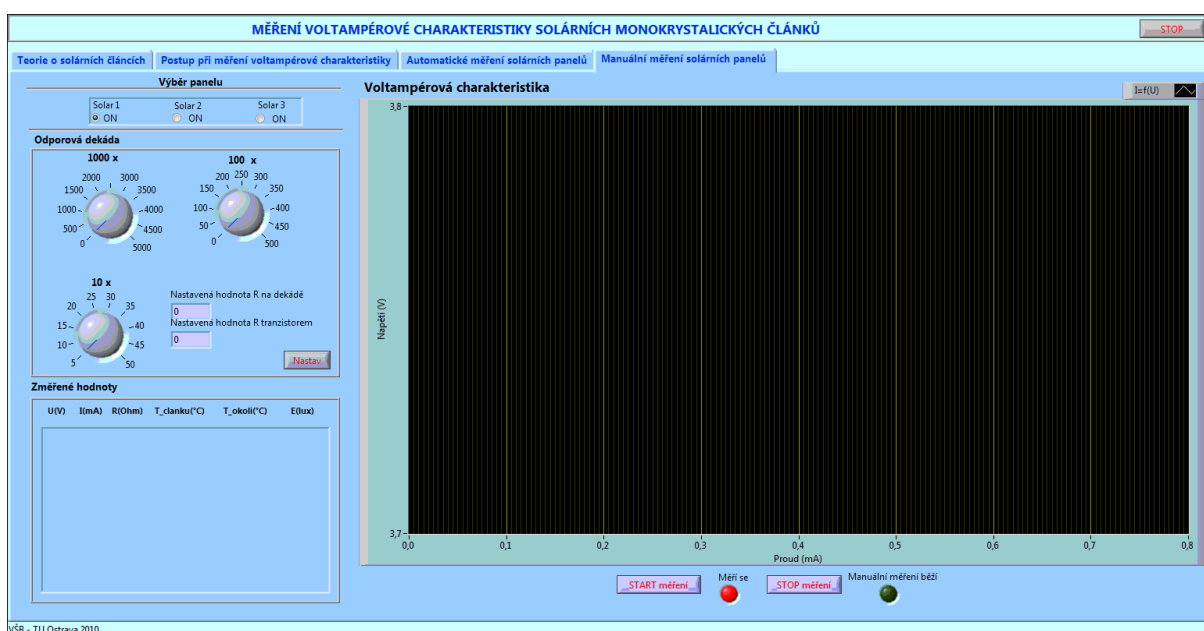
Hodnoty proudu, napětí, výkonu, osvětlení, teplota článků, teplota okolí se zaznamenávají do grafu v časové závislosti.

Z příslušných hodnot se dále vypočítává pomocí funkce vyhledání maximálního výkonu maximální bod výkonu a z něj následně faktor plnění.

d) Manuální měření solárních panelů

Poslední částí aplikačního programového vybavení je manuální měření VA charakteristik (viz.obr.36). Tento virtuální měřicí panel obsahuje:

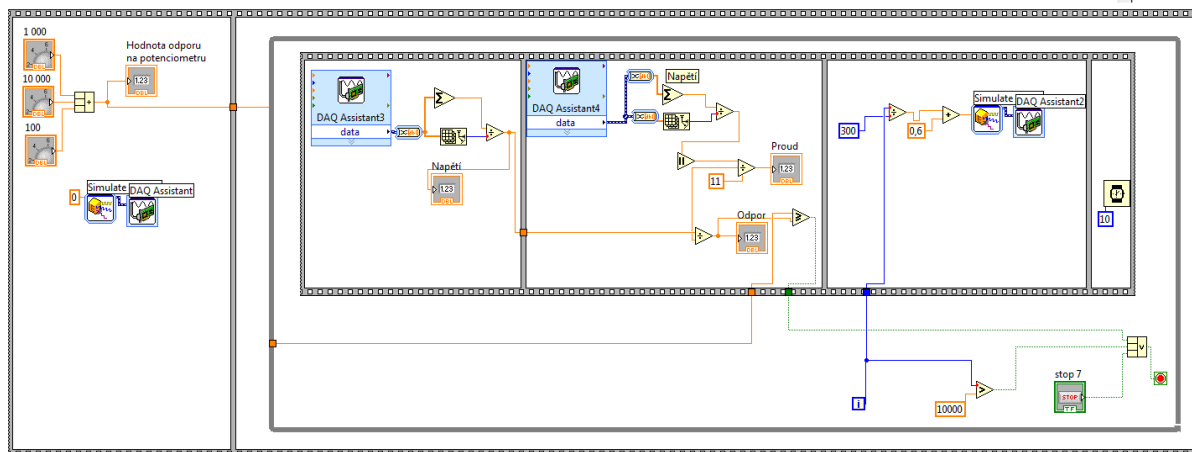
- výběr panelu,
- odporová dekáda – skládá se ze 3 potenciometrů o různé velikosti, na kterých se nastavuje postupné zatížení panelu,
- tabulku naměřených hodnot,
- signalizace, že program stále měří,
- zobrazovač intenzity osvětlení,
- zobrazovače teploty článku a okolí,
- tlačítka start a stop měření.



Obr.36: Okno Manuální měření solárních článků

Princip funkce tohoto okna spočívá ve výběru solárního FV panelu, který má být změřen (vždy pouze jeden ze tří) a následného spuštění měřicího cyklu tlačítkem *START měření*. Při stisku tohoto tlačítka se změří hodnota panelu nakrátko a program se dotáže, kde mají být ukládána měřená data. Jako v předchozím případě je zvoleno uložení souboru ve formátu .txt. Následně jsou nastavovány hodnoty zatěžového odporu. Toto nastavení je provedeno tak, že se nejprve nastaví požadovaná hodnota na potenciometrech a po stisku tlačítka *Nastav*, program nastaví zvolenou zátěž. Po nastavení odporu přípravkem Solar se automaticky změří příslušné hodnoty. Změření hodnot signalizuje virtuální LED *Měří se*, která se po skončení měření rozsvítí.

Hodnota zatěžového odporu se zvyšuje či zmenšuje. Při nepravidelném nastavování hodnot bude docházet k velkým chybám, které budou zapříčiněny otevíráním či zavíráním tranzistoru. Pro ukončení měření je potřeba „vykliknout“ tlačítko *Stop měření* (dvakrát kliknout na toto tlačítko). Tímto úkonem se ukončí ukládání do souboru a je možné začít měřit jiný FV panel.

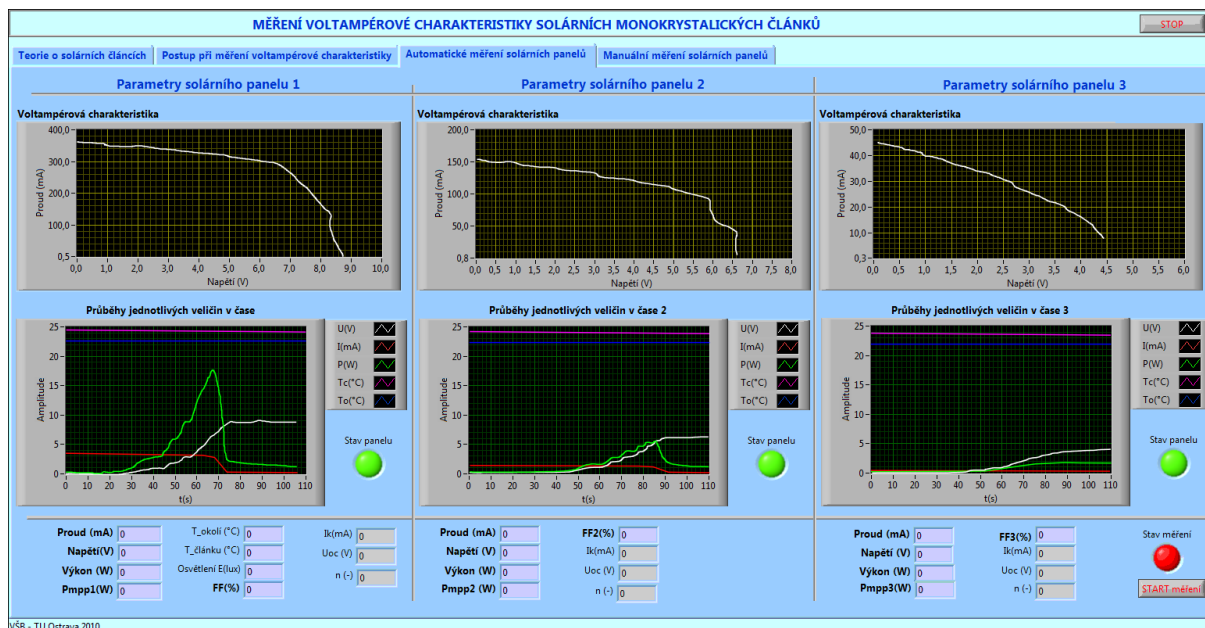


Obr.37: Blokové schéma programu nastavení zátěžového odporu

Zátěžový odpor je nastavován samostatným SUB VI dekádou. Na obr.37 je zobrazen kód programu.

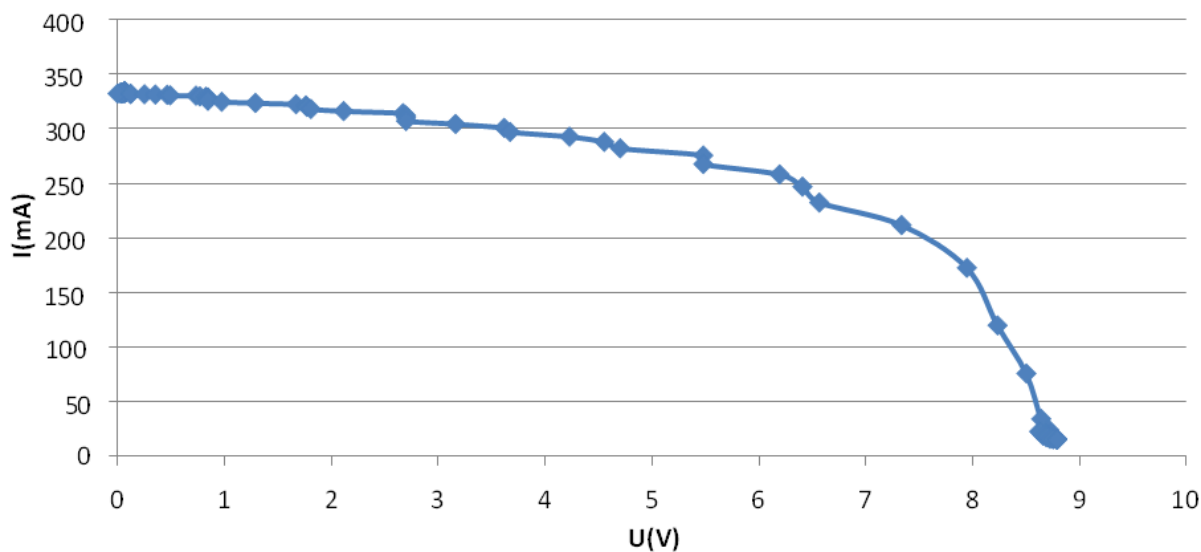
Základem je načtení hodnot z odporových potenciometrů a jejich výsledná hodnota je předána do dalšího cyklu a smyčky while loop, která se vykonává tak dlouho, dokud odpor z tranzistoru nebude mít alespoň přibližnou hodnotu jako je hodnota odporu z potenciometrů. Tento odpor je vypočítáván pomocí Ohmova zákona $R=U/I$, proud a napětí je získáván stejně jako u automatického měření jednoduchými přepočty.

6.1.4 Výsledky měření VA charakteristik FV panelů



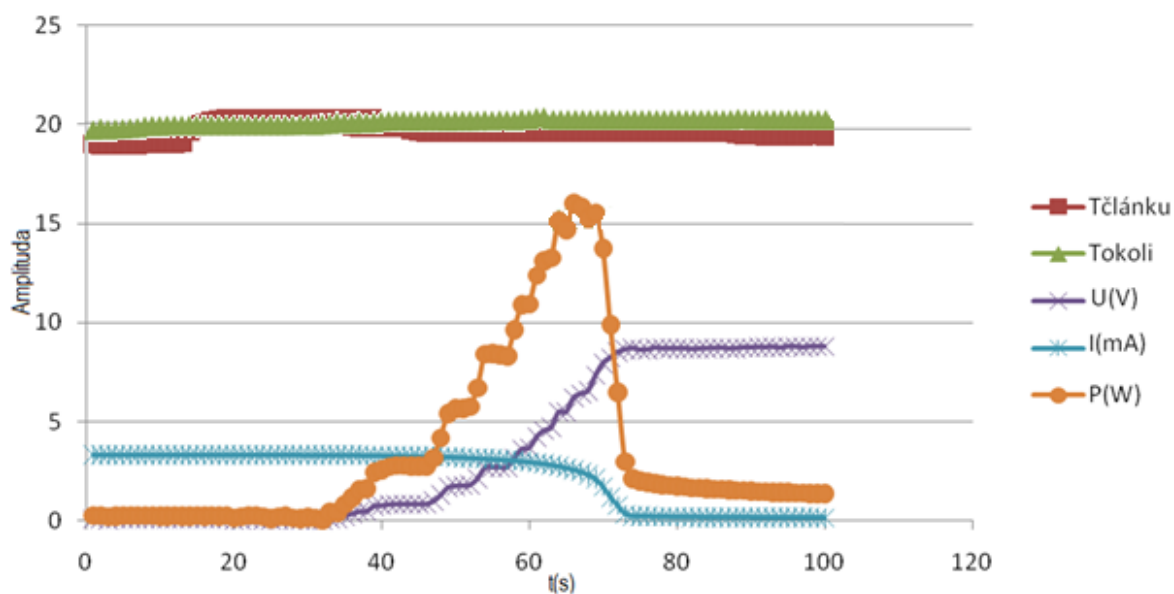
Obr.38: Změřené veličiny programem Solar

VA charakteristika solárního panelu 1



Obr.39: Vykreslená VA charakteristika panelu 1 z naměřených dat programem Solar

Časová závislost jednotlivých měřených veličin



Obr.40: Vykreslený průběh měřených veličin v MS Excel

6.2 Elektroluminiscenční test

6.2.1 Teoretický úvod

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.3.4, jedná se o test diagnostický, zjišťující jak vady ve struktuře FV článku, tak vady ve vedení FV napětí.

Měření začíná vybuzením fotonů přiloženým elektrickým polem, kdy se do FV článku použije jmenovité stejnosměrné napětí a proud z regulovaného zdroje v propustném směru. Velikost proudu a napětí závisí na velikosti panelu, který se měří. V našem případě je testován článek o velikosti 51,2 x 25,6 cm.



Obr.41 Testovaný článek

Tento test se provádí v uzavřeném boxu za tmy a obraz z kamery je přenášen do počítače. Sejmутý obraz je dále zpracováván například filtry obrazu, které odhalí různé typy defektů na FV panelu.

Aby bylo možné sejmутý obraz zpracovat, je nutné nejprve pochopit, jak je obraz reprezentován a jaké jsou možnosti jeho úprav, např. zvýšení lokálního kontrastu pomocí transformace histogramu, zvýšení detailnosti obrazu, detekce detailů a jejich hranic.

a) Číslicová reprezentace obrazu

Z algoritmického hlediska je výhodné diskretizovaný kvantovaný videesignál (číslicový obraz) reprezentovat pomocí rastru R a kvantovaných hodnot definovaných v jeho bodech. Mezi základní metody zpracování obrazu patří:

- a) Metody korekce zkreslených obrazů a formulace úlohy korekce
 - Vymezení problematiky korekce
 - Metody potlačení šumu v obraze
 - Korekce lineárních, nelineárních a geometrických zkreslení
- b) Metody a metodologie preparování a zlepšení vizuální kvality obrazů
 - Prahové metody preparování obrazu
 - Lineární a nelineární metody preparování
 - Lineární metody
 - Kombinované metody využívající specifika vizuálního vnímání
 - Geometrické transformace

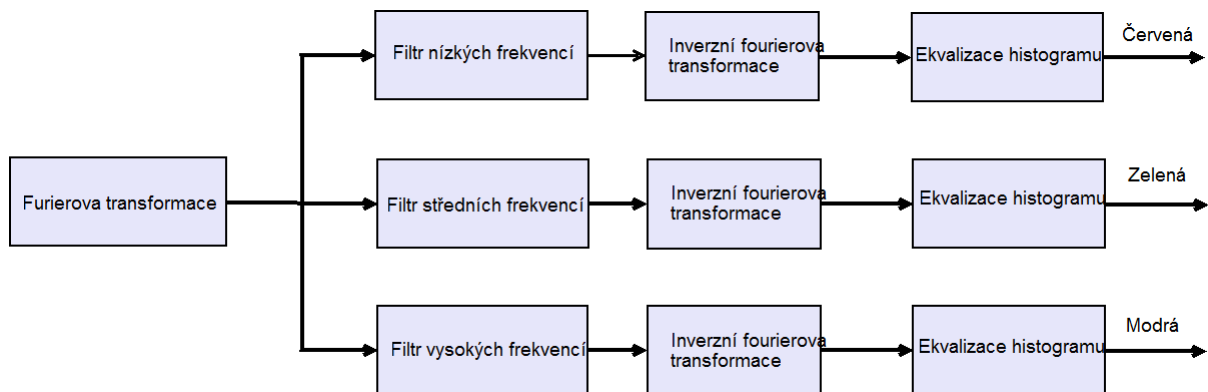
Lineární metody zpracování obrazu jsou v podstatě rozšířením metod korekce lineárních zkreslení. Je možno je chápat také jako optimální lineární filtraci signálu v šumu. Pod pojmem šum rozumíme detaily v obraze, které pro danou úlohu analýzy obrazu nejsou důležité. Tuto filtraci je možno

realizovat v prostorové nebo spektrální oblasti. Pozorovaný obraz přitom považujeme za aditivní směs zvýrazňovaných objektů a pozadí obrazu.

Za lineární metody zpracování obrazu lze považovat metody sčítání a odčítání obrazů mezi sebou, superpozice obrazu obrazem extrahovaným nebo preparovaným z jiného obrazu či totožného obrazu.

Dle rozsahu implementace algoritmů mluvíme o globální adaptaci obrazu nebo jen lokální, kdy jsou algoritmické přepočty obrazu implementovány jen na jeho část.

Pokud uvažujeme filtraci ve spektrální oblasti, je zřejmé, že objekty mající malý geometrický rozměr budou mít frekvenční oblasti maximum, ležící v oblasti vysokých prostorových frekvencí. Při extrakci větších detailů v obraze se maximum spektra posune do oblasti nižších prostorových frekvencí. Z tohoto vyplývají i zásady používání při preparování obrazu. Chceme-li extrahovat malé detaily – potlačujeme nízké frekvence. Potlačovat vysoké frekvence – pokud nám jde např. o vyhlazení obrazu.



Obr.42: Blokové schéma preparování obrazu ve spektrální oblasti s pseudobarvením.

b) Zvýšení lokálního kontrastu pomocí transformace histogramu

RM (rankové metody) se mohou používat ve všech operacích zpracování obrazů. Používají se pro standardizaci a vyhlazování obrazů, zvýraznění detailů obrazů, vyčleňování objektů z pozadí obrazu a detekci hranic objektů.

Poslední výzkum metod preparování obrazu vedl ke zevšeobecnění prahových metod s metodami využívající histogram obrazu. V publikacích byly navrženy a prozkoumány rankové algoritmy zpracování obrazu, které vycházejí z rankových charakteristik posloupností obrazových bodů pro různé druhy okolí. Mnohé nelineární transformace mají společný metodologický základ a je možno je považovat za speciální případy rankových transformací. Rankový algoritmus realizuje nelineární transformaci signálu. Tvar nelineární funkce závisí na dané podmnožině rankových statistik určitého výběru vzorků, tvořeného vzorkem signálu a nějakým jeho okolím. Výběr statistik a okolí bodů je velmi významné.

RM v porovnání s metodami lineární filtrace jsou více lokálně adaptivnější, protože vycházejí z histogramu okolí, které je lokální charakteristikou obrazu. Nemají prostorovou setrvačnost – vliv jednotlivých detailů se rozprostírá ve výsledném obraze do vzdálenosti apertury použitého filtru. Důsledkem této setrvačnosti je např. rozmazávání hranic detailů nebo jejich zkreslení tvaru při extrakci z pozadí.

Principiálním nedostatkem RM je to, že tyto metody nevyužívají prostorovou souvislost mezi obrazovými body. Toto se projeví ve skutečnosti v histogramu relativních četností hodnot videosignálu v okolí daného bodu rastru.

c) Zvyšování detailnosti obrazu

Zvýraznění detailů v obraze je protikladem k metodám vyhlazování obrazů. Při vyhlazování se rozdíly detailů stírají. Při zvýrazňování detailů je cílem tyto rozdíly zvětšit. Proto se zvýšení detailnosti obrazu nazývá také zvýšením lokálních kontrastů (dále jen ZLK).

ZLK se dosahuje prostřednictvím měření hodnot videosignálu v daném obrazovém bodě a hodnot videosignálu v bodech jej obklopujících a pomocí zesílení těchto rozdílů.

Nejznámější a nejjednodušší metodou je metoda neostré masky, dále pak metody klouzavé ekvalizace histogramu a její zevšeobecněná varianta metoda mocninné intenzifikace.

d) Detekce detailů a jejich hranic

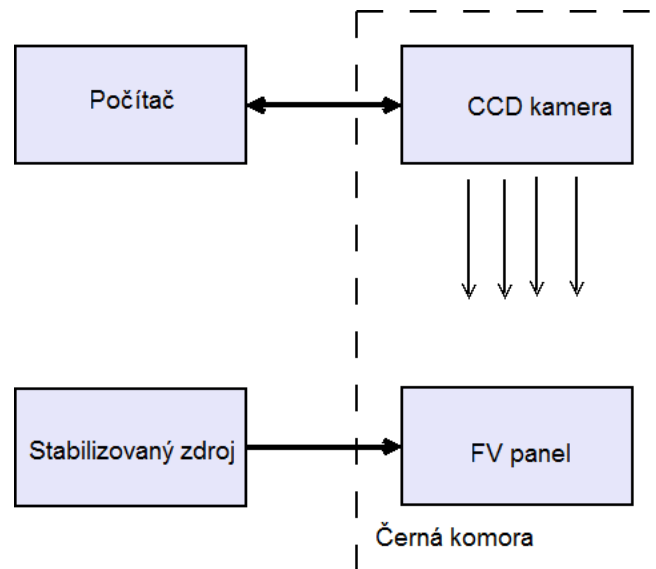
Algoritmy pro zvýšení lokálních kontrastů a extrakce detailů jsou velmi podobné algoritmům detekce detailů a jejich hranic. Tyto algoritmy preparování obrazu zjišťují míru statistického nesouladu mezi charakteristikami rozdělení hodnot videosignálu v bodech celého okolí centrálního bodu a danými statistickými charakteristikami, které popisují rozdělení hodnot videosignálu v hranicích detailů.

V případě úlohy detekce detailů se rozměr okolí volí blízký rozměru detailů, které je třeba detekovat. V případě detekce hranic detailů, je třeba tento rozměr volit v rozsahu rozměru hranic detailů. Samotná detekce se sestává přitom z porovnání vypočítané míry shody se zvoleným prahem.

[33]


6.2.2 Technické prostředky

Měřicí řetězec (obr.43) pro elektroluminiscenční test se skládá z počítače, CCD kamery, která snímá obraz snímatelného solárního panelu a stabilizovaného zdroje, na kterém nastavujeme velikost proudu a napětí.

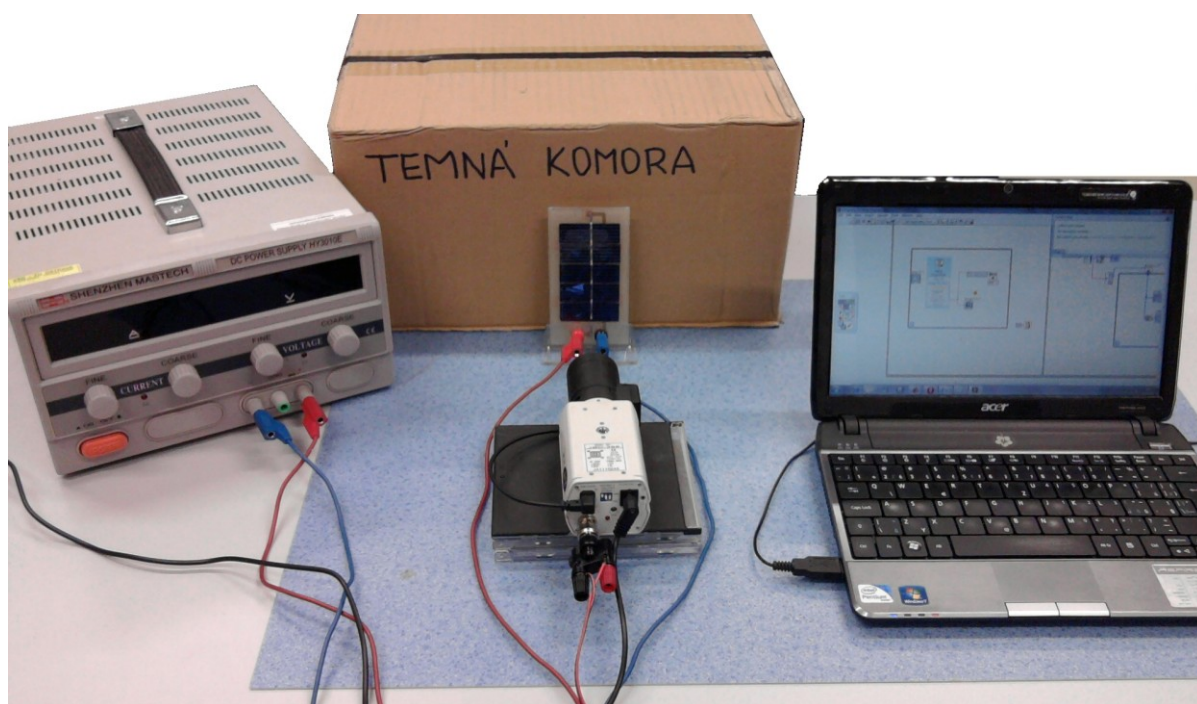


Obr.43: Blokové schéma soustavy pro elektroluminiscenční test

Laboratorní soustava je založena na PC s I/O modulem pro vstup videosignálu, CCD kameře a laboratorním zdroji.

| | | |
|---|------------------------------------|------------------------------|
|  | formát | 1/3"CCD prvek, 537x597 pixel |
| | rozlišení | 480 řádků |
| | horizontální frekvence | 15,750kHz |
| | vertikální frekvence | 60Hz |
| | citlivost | 0,01 luxu/F 1,2, C/CS-mount |
| | DC/VIDEO-drive, AES, BLC, ALC, AGC | |
| | rozměry | 57x47x85mm |
| | napájení | 12Vss/1,2W |

Tab.6: Parametry použité černo-bílé CCD kamery

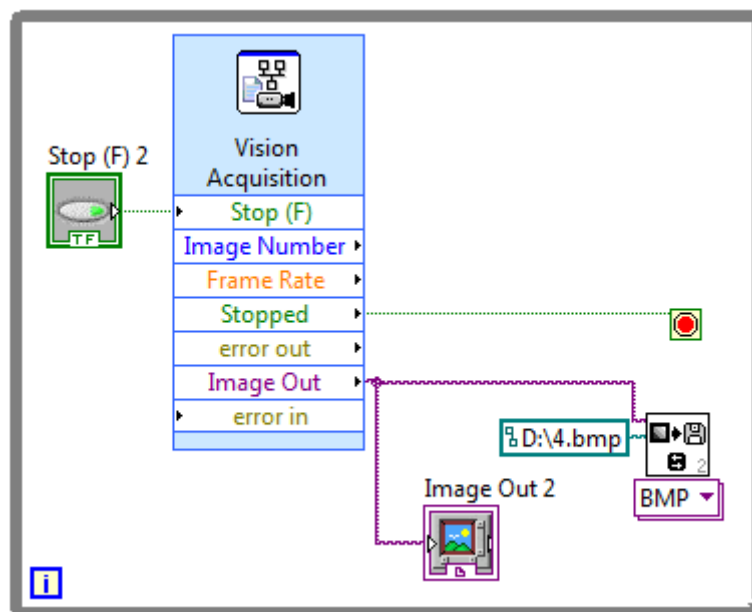


Obr.44: Laboratorní soustava pro měření elektroluminiscence FV článků

6.2.3 Programové vybavení

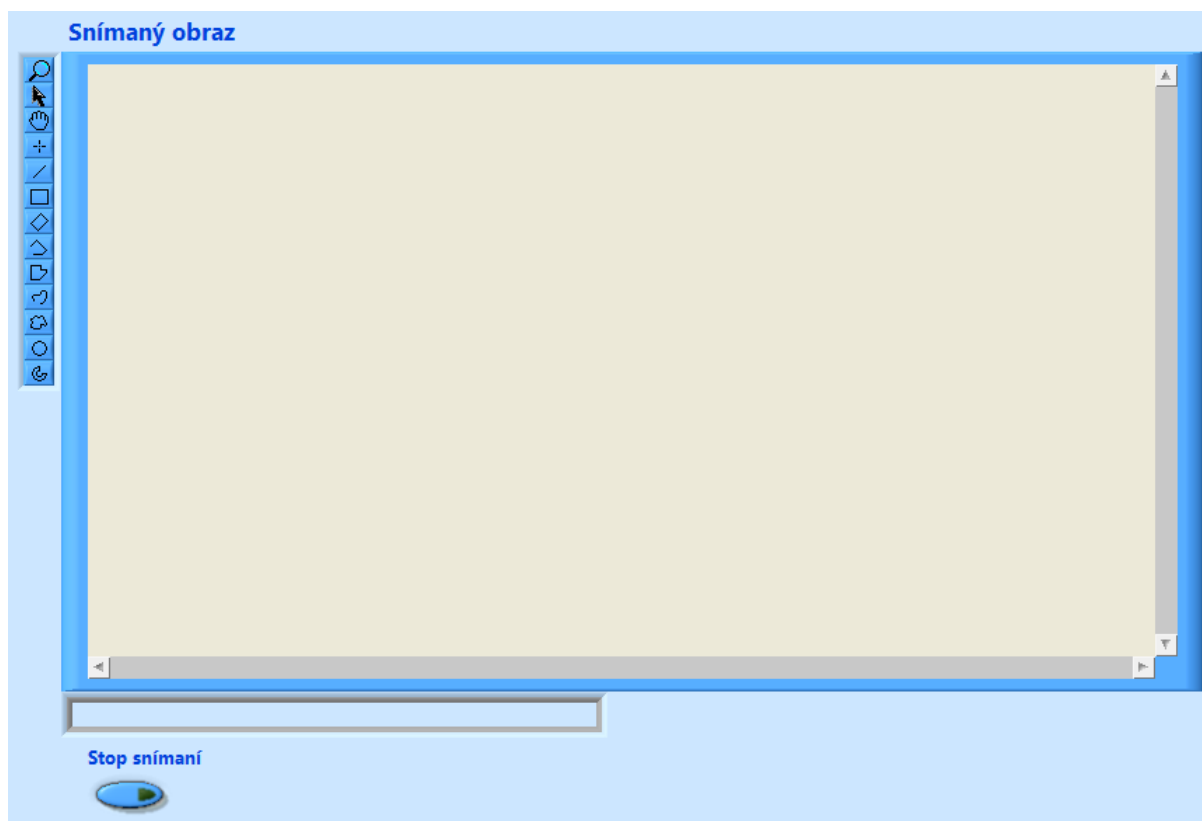
Při tomto testu se načítají data z kamery do prostředí LW, kde jsou v daný okamžik uloženy jako obrázek, se kterým se dále pracuje.

Načtení obrazu je provedeno pomocí Vision Acquisition, kde si nastavíme počáteční parametry kamery (jak chceme snímat data, v jakém rozlišení chceme, aby kamera snímala, ...).



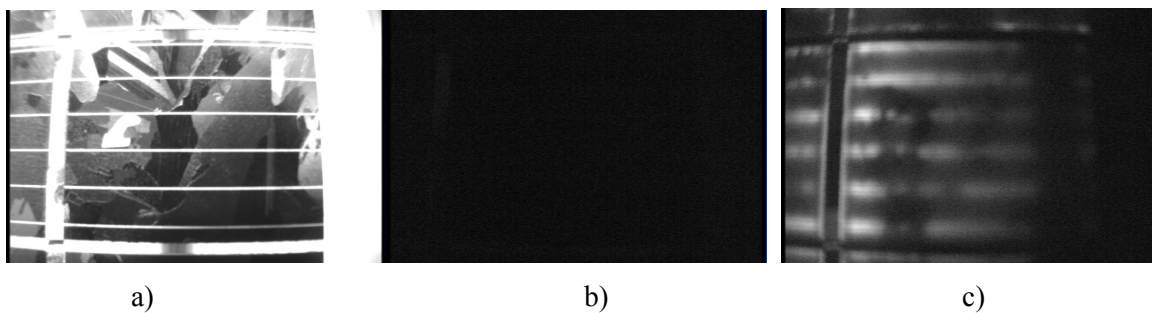
Obr.45: Kód načtení obrazu z kamery a uložení obrazu do bmp obrázku

Jak je z obrázku (obr.45) vidět, obraz z kamery je v našem případě staticky ukládán na disk D pod názvem 4.bmp. Kvalitu uložení obrázku si můžeme zvolit z několika variant, které nabízí IMAQ Write File.



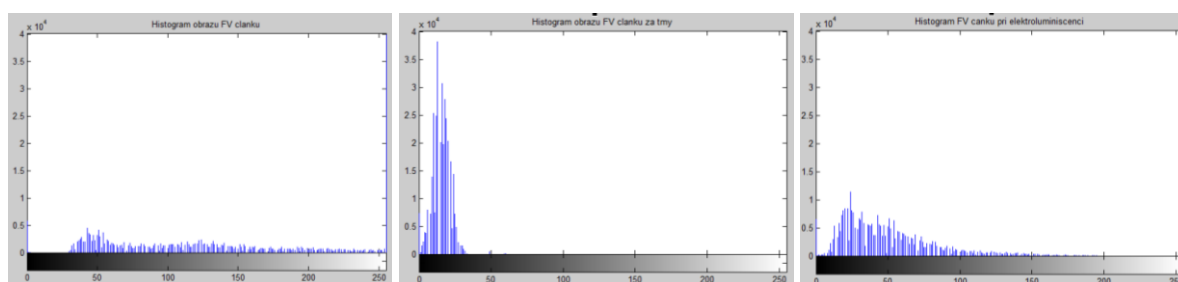
Obr.46: Aplikační okno snímání obrazu

6.2.4 Výsledky měření a zpracování obrazové informace



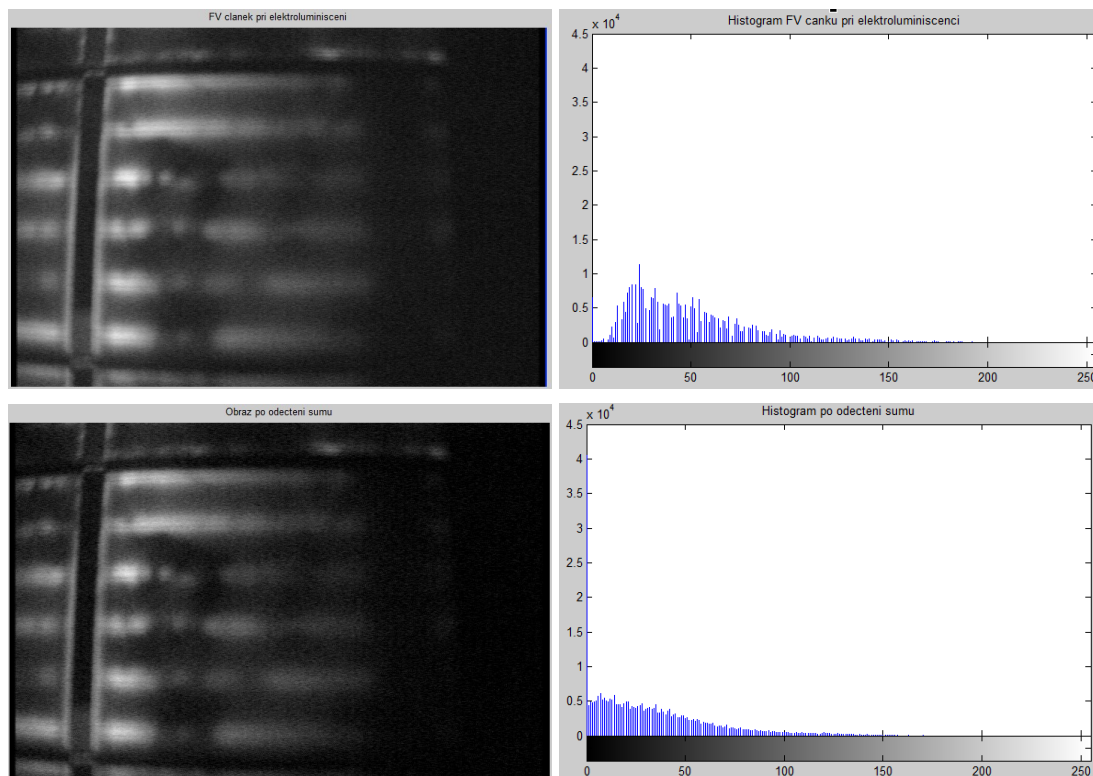
a) FV článěk za denního osvětlení, b) FV článěk v temné komoře, c) FV článěk připojený ke zdroji ss proudu

Obr.47: Zachyceny obrazy FV článků za různých podmínek



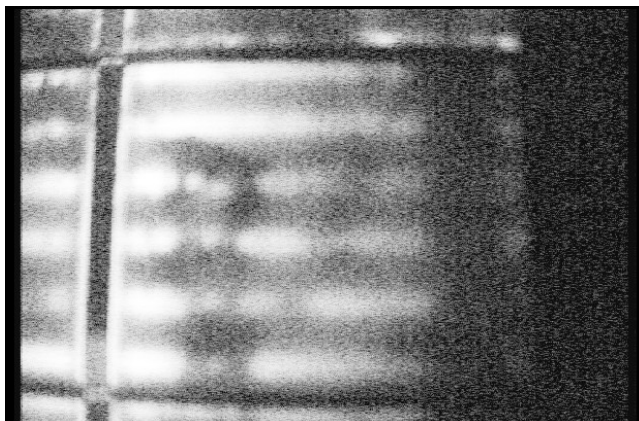
Obr.48: Histogramy sejmutých FV článků za a,b,c podmínkách

Jelikož je při tomto měření použita relativně nekvalitní kamera je nutné od posledního sejmutého obrázku (FV článěk připojen ke ss zdroji proudu) odečíst šum kamery.

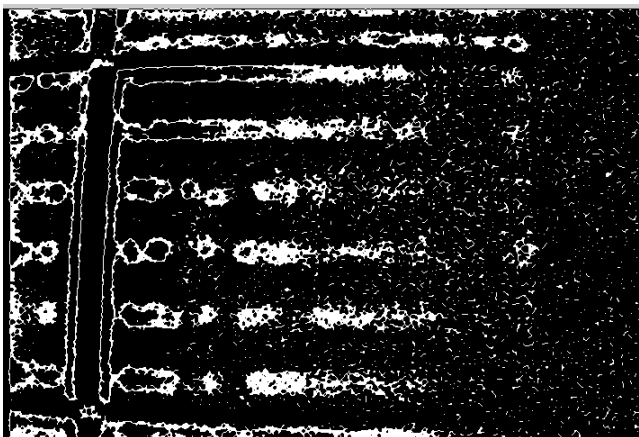


Obr.49: Porovnání zašuměného obrázku s obrázkem po filtraci .Histogram daného obr. vpravo.

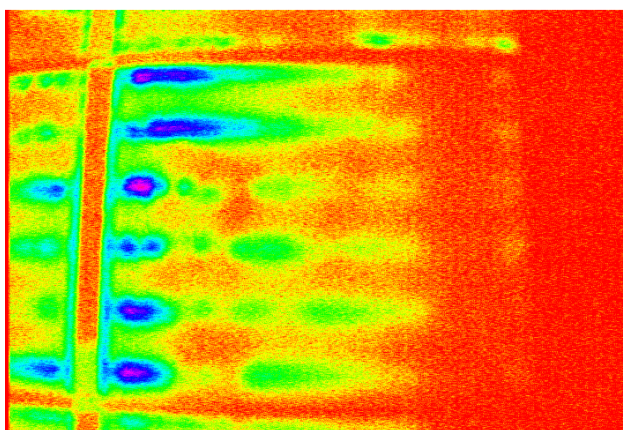
Dále již zpracováváme takto upravený obraz dle potřebných filtrací v programu Matlab, tak abychom dosáhli potřebných informací, viz. *Příloha VI: Filtrace obrazu*



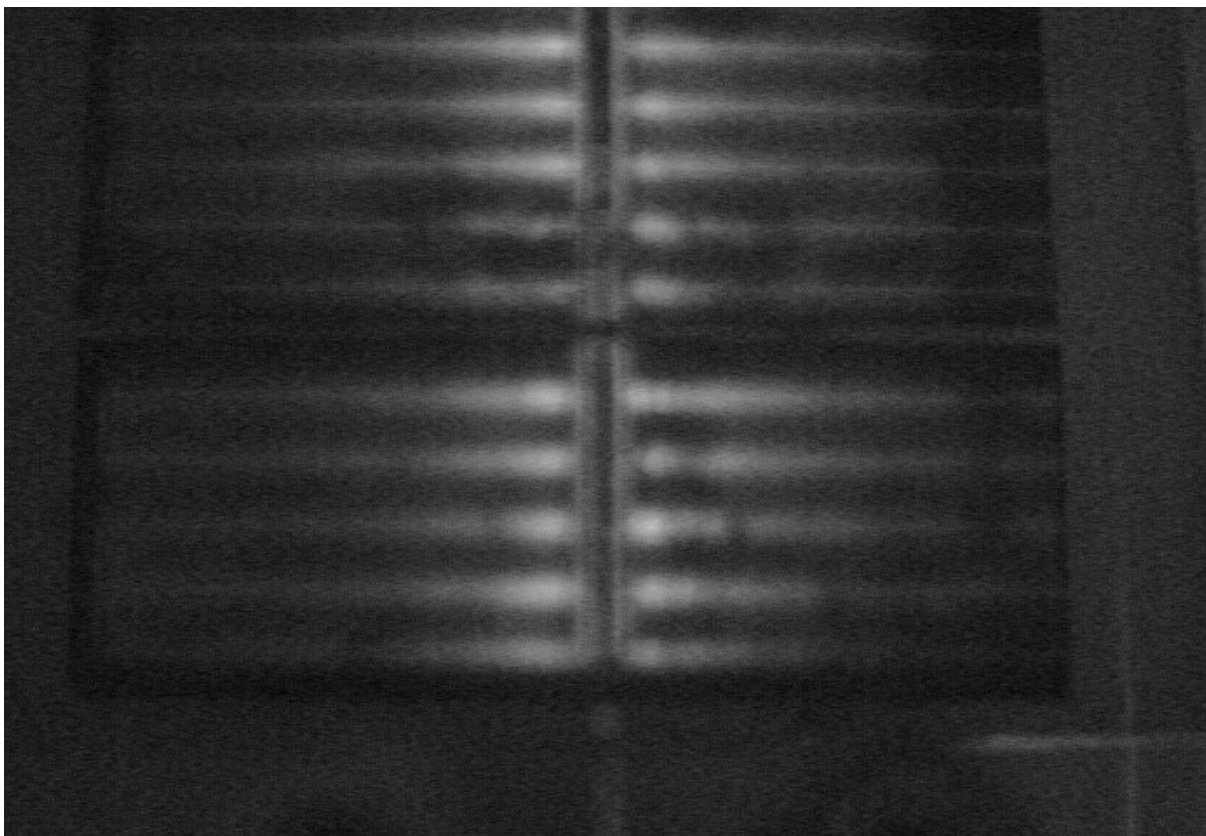
Obr.50: Obraz po ekvalizaci



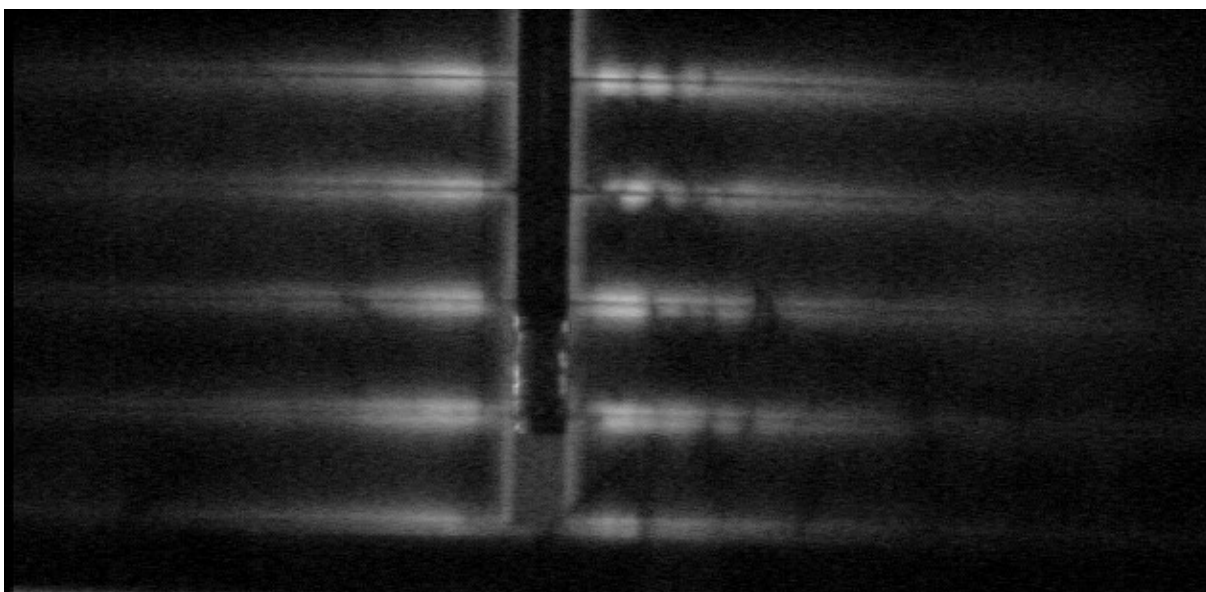
Obr. 51: Zvýraznění hran



Obr.52: Lineární transformace rastru sledovaného článku s využitím zvýraznění artefaktů metodou pseudobarvení



Obr.53: Ukázka jiného FV článku při elektroluminiscenci



Obr.54: Detailní ukázka vad na FV článku při elektroluminiscenci

7 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou Měřicího systému solárního fotovoltaického systému. Na základě zásad pro její vypracování jsem se seznámila s problematikou alternativních a obnovitelných zdrojů energií. Nastudovala jsem si teoretický základ fotovoltaických solárních článků panelů a jejich provozních měření. V předložené práci je uveden text shrnující nastudovanou problematiku. Problematika měření fotovoltaických solárních článků a panelů byla konzultována v rámci návštěv pro seznámení s technologií a praktických měření realizovaných u společnosti Schott Solar ve Valašském Meziříčí. Seznámila jsem se s problematikou podrobněji i díky zorganizované exkursi u společnosti Schott Solar ve vývojovém centru v Alzenau v SRN. V rámci řešení diplomové práce jsem se účastnila návštěvy výstavy Intersolar v Mnichově. V období let 2009-2011 jsem se aktivně účastnila svou prací v oblasti solárních fotovoltaických systémů v projektech a při řešení HS na katedře měřicí a řídicí techniky. V roce 2010 jsem podala žádost k DAAD pro podporu mého studijního pobytu u Schott Solar v Alzenau v roce 2011. Mám zájem své znalosti v oblasti obnovitelných a alternativních zdrojů energií a implementovaných senzorů, snímacích systémů a metod a měřicích systémů nadále rozšiřovat formou doktorandského studia na VŠB-TUO.

Popsané metody a realizovaná měření jsou poplatná výběru konzultovaného s vedoucím diplomové práce a zájmy sdělenými představiteli vývojového oddělení Schott Solar z Alzenau s cílem mého bližšího seznámení s problematikou a získání praktických dovedností v této oblasti. Realizované měřicí systémy a měření byly stylizovány do podoby laboratorních úloh doplněných o obšírné oblasti textů s teoretickým úvodem do problematiky tak, aby byly využitelné pro výuku i na úrovni středoškolských studentů a jejich motivaci k dalšímu studiu technických oborů.

Vzhledem k současným trendům je laboratorní úloha v rámci předložené DP realizována prostřednictvím PC za pomoci programu LabView a měřicího modulu National Instruments. Tato kombinace nám zajišťuje komfortnost a variabilnost řešení. Jsme však omezeni přenosovou rychlostí modulu, která je však pro demonstrační laboratorní účely dostačující. Pokud bychom tento produkt chtěli použít v průmyslu, museli bychom zvolit vhodnější typ měřicí karty s více vstupy a výstupy, s větší přenosovou rychlostí popřípadě s větším napětovým rozsahem na vstupech.

Prostředí LabView nám umožňuje kreativnost řešení a snadné doplnění o další funkce, které bychom chtěli do programu zanást.

Samotný aplikační program je přehledný a snadno ovladatelný. Součástí tohoto programu je text teoretického základu zaměřený na problematiku solárních fotovoltaických článků, jejich historii, výrobu, materiály a využití v systémech.

Při testu elektroluminiscenční metodou je solární článek nebo panel napájen v propustném směru. Metoda je použita na dokončený solární článek s kontakty. Bylo vyvinuto velmi levné demonstrační zařízení, které umožňuje nasnímat záření fotovoltaického solárního článku pomocí černo-bílé CCD kamery citlivé na záření v infračervené oblasti. Takto je možno demonstrovat funkci metody a je možno metodu zpracování informací o měřeném článku rozvíjet na jiné úrovni – na úrovni metod zpracování obrazové informace.

Programové vybavení řízení procesního měření metodou elektroluminiscence byla taktéž realizována v prostředí LW. Kde je snímán obraz z kamery a ukládán do datových souborů na HDD. Obraz z použité CCD kamery je velmi nekvalitní (zašumělý i po odečtení známého šumu za tmy), tento problém se dá odstranit profesionálně použitím chlazených CCD kamer, které jsou ale finančně velmi náročné.

Vzhledem k tomu, že prostředí LW není příliš optimální pro další práci s obrazem, zvolila jsem program MATLAB a v něm realizovala příslušné filtry pro detekci hran, ekvalizaci a lineárních filtrů.

Výsledky měření jsou velmi zajímavé i při takto nekvalitním vstupním obrazu. Je možno velmi dobře pozorovat chyby ve struktuře článku.

Metody zpracování obrazové informace jsou samy o sobě velmi širokým oborem, který vyžaduje hlubší studium. Každý z artefaktů vyskytujících se na sledovaném článku vyžaduje specifický přístup ke zpracování obrazové informace a tedy i hlubokou znalost použitelných matematických metod. Implementované matematické metody využívající program MATLAB jsou jen demonstrační a další práce by měly být směřovány právě pro jejich rozvíjení v součinnosti s např. potřebami společnosti Schott Solar.

8 Použitá literatura

- [1.] HORÁK BOHUMIL. *Fotovotaické solární systémy*. Presentace pro střední školy, 2008 [20.6.2010]
- [2.] TOMAN MARTIN. *Termojaderná fúze*. Jižní Čechy: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích[online], 12.08.2010 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Termojaderna%20fuze.pdf>>
- [3.] FUKÁTKO TOMÁŠ. *Detekce a měření různých druhů záření*, BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-193-3
- [4.] ZUPANČIČ BORIS. *Šetrné budovy 2011, Nové energetické trendy* [online], 08.08.2010 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.setrnebudovy.cz/component/content/article/33#toc1>>
- [5.] *Solární systémy a tepelné čerpadla* [online], 23.07.2010 [20.8.2010]. Dostupné z <<http://www.vsolar.cz/?page=produkty/solarni-systemy/teorie-solarni-techniky>>
- [6.] *Wikipedia, informační portál* [online], 11.07.2010 [20.08.2010]. Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sluneční_energie>
- [7.] KAPOUN JAN. *Fakulta pedagogická, oddělení fyziky* [online], 08.07.2010 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.kof.zcu.cz/st/dp/hosnedl/html/slunecni.html>>
- [8.] *VOPA Solar energetic, realizace solárních elektráren* [online]. 2009 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.vopa-solar.eu/index.php?page=solar-system&hl=cze>>
- [9.] *Skupina ČEZ* [online], 2010 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k13.htm>>
- [10.] HORÁK BOHUMIL, FRIEDRISCHKOVÁ KRISTÝNA. *Sluneční záření a jeho energetické využití*, Rešerše k projektu VAVE, 2009 Ostrava - Poruba
- [11.] *IT serve, poradenská firma z oblasti inovativních technologií* [online], 2008 [20.08.2010]. Dostupné z <http://www.itserve.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=48>
- [12.] *Isolar, firma zabývající se fotovoltaikou* [online]. 2009 [20.08.2010]. Dostupné z <http://www.isolar.cz/technologie.html#ctvrta_generace>
- [13.] *H-Energy Systems* [online]. 2009 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://www.h-energy.cz/fotovoltaika/princip>>
- [14.] KOPECNÝ JAN. *Výukový materiál o křemíku*. Ostrava: Vysoká škola báňská technická univerzita Ostrava [online]. 2009 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Kremik.pdf>>
- [15.] VÁLEK JAN. *Studium degradace tenkých vrstev*. Brno: Masarykova univerzita katedra fyziky- pedagogická fakulta. 1.06.2009 [20.8.2010]. Vedoucí: doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.
- [16.] KEKULE JAROMÍR. *Elektrina a magnetismus, Výukový portál* [online]. 2009 [20.08.2010]. Dostupné z <http://www.vossost.cz/svab/elektross/skripta/kap3/3_1.html>
- [17.] KUNC ALEŠ. *Základní škola Jihlava* [online]. 2009 [20.8.2010]. Dostupné z <http://www.zsseifertova.ji.cz/vzdel_a_vych/slundos/fv.pdf>
- [18.] *TZB INFO, firma zabývající se stavebnictvím, úsporou energií a technickým zařízením budov* [online]. 2007 [20.08.2010]. Dostupné z <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5470>>

- [19.] *JOYCE, firma zabývající se realizací fotovoltaických elektráren* [online]. 2008 [20.8.2010]. Dostupné z <http://www.joyce-energie.cz/files/files/Mono_poly_rozdl.pdf>
- [20.] *Solární projekty, firma zabývající se realizací fotovoltaických elektráren* [online]. 2020 [20.8.2010]. Dostupné z <<http://www.solarniprojekty.cz/informace/technologie/>>
- [21.] *SUNNY watt, firma zabývající se realizací fotovoltaických elektráren* [online]. 2010 [20.8.2010]. Dostupné z <<http://www.solarnielektrarny.cz/?s=amorfn%C3%AD>>
- [22.] *Turbo solar s.r.o, firma zabývající se realizací fotovoltaických elektráren* [online]. 2010 [20.8.2010]. Dostupné z <<http://www.heliostar.cz/fotovoltaika.php>>
- [23.] SCHOTT SOLAR s.r.o. *Technická dokumentace k testeru*. 2010 [22.8.2010]. Interní materiál firmy Schott Solar s.r.o.
- [24.] *Elektronická součástka Pt100*. Ostrava: GM electronic, 2010
- [25.] *Elektronická součástka NTC640*. Ostrava: GM electronic, 2010
- [26.] *Elektronická součástka BT83N4*. Ostrava: GM electronic, 2010
- [27.] *Elektronická součástka BC337*. Ostrava: GM electronic, 2010
- [28.] KAFKA MARTIN. *Fotoluminiscenční diagnostická metoda s transmisním osvětlením, Diplomová práce*, Brno: Vysoká učení technické v Brně [online]. 16.8.2010 [31.12.2010]. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14374>
- [29.] ROČEK RADOVAN. *Modifikace měřicího pracoviště pro měření solárních článků, Diplomová práce*. Brno: Vysoká učení technické v Brně [online]. 16.8.2010 [31.12.2010]. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14000>
- [30.] WIKIPEDIA, *Internetová encyklopedie – česká verze* [online]. 5.12.2010 [31.12.2010]. Dostupné z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektroluminiscence>>
- [31.] HOFMAN PAVEL, POSPÍŠIL JIŘÍ. *firma ABOT fotovoltaická zařízení s.r.o.* [online]. 2010 [31.12.2010]. Dostupné z <<http://www.abot.cz/cs/o-nas>>
- [32.] STEINER PATRIN. *Charakterizace elektrických vlastností solárních článků pomocí CCD kamery, Diplomová práce*. Brno: Vysoká učení technické v Brně [online]. 2008 [31.12.2010]. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=10333&fid=5&rok=2007&typ=2&hl_klic_slova=0&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=0&str=23>
- [33.] LEONID JAROSLAVSKIJ, IVAN BAJLA. *Metódy a systémy číslicového spracovania obrazov*, 1.vyd, Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00046-4
- [34.] ĎAĎO STANISLAV, KREIDL MARCEL. *Senzory a měřicí obvody* 1.vyd, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996.315s. ISBN 80 -01-01500-9.
- [35.] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR. Studie analyzující současný stav, předpoklady rozvoje od r.2010 a výhled vzdálenějšího horizontu*. 1.vyd.Praha:ČEZ, 2003.144s.

9 Seznam příloh

- I. Slunce a fotovoltaika
- II. Měření spekter umělého osvětlení
- III. Měření teplotních vlivů na fotovoltaický článek
- IV. Fotovoltaické systémy
- V. Ekologický pohled na fotovoltaiku
- VI. Filtrace obrazu